

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ŘÍZENÍ ELEKTROMECHANICKÉ SOUSTAVY S LINEÁRNÍM MOTOREM

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

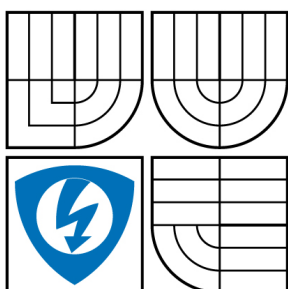
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. KATARÍNA JUDINYOVÁ

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ŘÍZENÍ ELEKTROMECHANICKÉ SOUSTAVY S LINEÁRNÍM MOTOREM

CONTROL OF THE ELECTROMECHANICAL SYSTEM WITH A LINEAR MOTOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

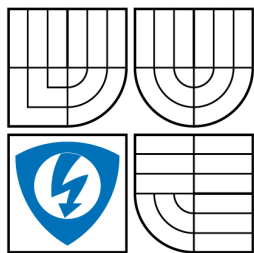
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. KATARÍNA JUDINYOVÁ

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. PAVEL VÁCLAVEK, Ph.D.

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Studentka: Bc. Katarína Judinyová

ID: 83681

Ročník: 2

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Řízení elektromechanické soustavy s lineárním motorem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s vektorovým řízením synchronního motoru. Realizujte algoritmus v prostředí Matlab-Simulink a převedte jej do tvaru, který bude odpovídat řízení lineárního motoru. Ověřte chování algoritmu ve spojení s jednoduchými mechanickými systémy a ukažte vliv nepřesností ve znalosti parametrů na kvalitu regulačního děje

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Caha, Z., Černý, M.: Elektrické pohony

Šubrt, J.: Elektrické regulační pohony

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 25.5.2009

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Václavek, Ph.D.

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Názov práce: Řízení elektromechanické soustavy s lineárním motorem
Autor: Katarína Judinyová

Abstrakt

Predložená diplomová práca sa zaoberá všeobecným princípom fungovania elektrických pohonov a konštrukciou synchronného elektrického motora. Obsahuje porovnanie lineárneho motora s rotačným motorom s prevodovkou a venuje sa konštrukcii lineárneho motora. Bližšie sú opísané bežné typy lineárnych pohonov na trhu. Ďalej sa diskutuje popis veličín synchronného rotačného motora pomocou komplexorov, Clarkovej a Parkovej lineárnej transformácii rovníc. Je vysvetlený princíp vektorovo orientovaného riadenia elektrického pohonu. Je ukázaný spôsob prevodu parametrov konkrétneho lineárneho motora na rotačné ekvivalenty, ktoré slúžia ako vstupy pre model. K modelu je navrhnutá bloková schéma riadenia na žiadané translačné posunutie a vyhodnotená kvalita regulácie. Na záver je predložená simulácia priebehov skúmaných veličín pri zmene parametrov lineárneho motora, ktoré nastávajú v prevádzke.

Kľúčové slová

motor, lineárny motor, lineárny synchronný motor s permanentnými magnetmi, elektromechanická sústava, vektorové riadenie, riadenie

Title: Control of the Electromechanical System with a Linear Motor
Author: Katarína Judinyová

Abstract

The submitted Master's thesis deals with the general principle of the electric drives' functioning and with the construction of a synchronous electric motor. A comparison of a linear drive and a rotary drive with rack and pinion system is provided, as well as an overview of common type linear drives. A mathematical model of a rotary synchronous motor, the Clark's and Park's transformation and the principle of vector control is explained. A method of the linear parameters' conversion to the rotary equivalents is demonstrated. A block diagram to motor control is designed. The control quality is tested by various criteria. Lastly, there is a simulation provided on how the changes of motor's parameters affect the control quality.

Key words

motor, linear motor, linear synchronous motor with permanent magnets, electromechanical system, vector control, control

Bibliografická citace

JUDINYOVÁ, K. Řízení elektromechanické soustavy s lineárním motorem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 82 s.
Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Václavek, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Řízení elektromechanické soustavy s lineárním pohonem jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Pavlovi Václavkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne:

.....
podpis autora

OBSAH

1. ÚVOD	8
2. ELEKTRICKÝ POHON	9
2.1 Pohybová rovnica elektrického motora.....	9
2.2 Synchronný elektrický motor.....	10
3. LINEÁRNY POHON	12
3.1 Porovnanie lineárnych pohonov s rotačnými pohonmi vybavenými prevodovkou na translačný pohyb	13
3.2 Typy lineárnych motorov	14
3.2.1 Cylindrický lineárny motor (Cylindrical moving magnet linear motor)	15
3.2.2 Lineárny motor s profilom U (U Channel linear motor)	15
3.2.3 Plochý lineárny motor (Flat type linear motor)	15
3.2.4 Lineárny synchronný motor s permanentnými magnetmi (Linear permanent magnet synchronous motor, LPMSM)	17
4. MATEMATICKÝ POPIS ELEKTRICKÉHO POHONU.....	19
4.1 Parkova lineárna transformácia rovníc (Park's transformation)	19
4.2 Clarkova lineárna transformácia rovníc (Clark's transformation)	20
4.3 Matematický popis synchronného motora	21
4.4 Decoupling	26
4.5 Vektorovo orientované riadenie pohonu (Space Vector Control)	28
5. RIADENIE MOTORA.....	30
5.1 Parametre lineárneho motora	30
5.2 Prepočet lineárnych parametrov na rotačné a naspäť	30
5.3 Vstupné hodnoty pre simuláciu	32
5.4 Návrh regulačného obvodu	32
5.4.1 Bloková schéma.....	32
5.4.2 Kritériá kvality regulácie	36
5.4.3 Konštanty pre regulátory	37
6. VPLYV ZMIEN PARAMETROV MOTORA NA REGULÁCIU	39

6.1	Teplotné zmeny odporu vinutí R	39
6.2	Zmeny hmotnosti záťaže	47
7.	ZÁVER	56
8.	ZOZNAM LITERATÚRY	57
9.	ZOZNAM OBRÁZKOV	59
10.	ZOZNAM SKRATIEK A SYMBOLOV	61
11.	ZOZNAM PRÍLOH	63
12.	PRÍLOHY	64
12.1	Príloha č. 1 – Zdrojový kód	64

1. ÚVOD

V prvej časti práce sa zaoberám všeobecným princípom fungovania elektrických pohonov a konštrukciou synchronného elektrického motora.

Druhá časť je venovaná porovnaniu lineárneho motora s rotačným motorom s prevodovkou a konštrukcii lineárneho motora. Bližšie sú opísané bežné typy lineárnych pohonov na trhu.

V nasledujúcej kapitole sa diskutuje popis veličín synchronného rotačného motora pomocou komplexorov, Clarkovej a Parkovej lineárnej transformácii rovníc. Je vysvetlený princíp vektorovo orientovaného riadenia elektrického pohonu.

Ďalej je ukázaný spôsob prevodu parametrov konkrétneho lineárneho motora na rotačné ekvivalenty, ktoré slúžia ako vstupy pre model. K modelu je navrhnutá bloková schéma riadenia na žiadané translačné posunutie a vyhodnotená kvalita regulácie.

Na záver je predložená simulácia priebehov skúmaných veličín pri zmene parametrov lineárneho motora, ktoré nastávajú v prevádzke.

2. ELEKTRICKÝ POHON

Elektrický pohon je zariadenie uskutočňujúce elektromechanickú premenu energie. Jeho úlohou je uviesť poháňaný pracovný mechanizmus predpísaným spôsobom do určitého pohybového stavu, určeného jeho funkciou tak, aby bola pracovným mechanizmom uskutočnená technologická operácia alebo zaistený technologický proces. [1]

Podľa druhu vykonávaného pohybu triedime elektromotory na točivé a priamočiare (lineárne). Podľa toho, či sa elektrické motory pripájajú ku striedavému alebo jednosmernému zdroju energie rozoznávame striedavé alebo jednosmerné motory. Striedavý zdroj býva jedno- alebo viacfázový, najčastejšie trojfázový.

Motor sa skladá zo statoru a rotoru, ktoré sú vybavené vinutím. Vinutie býva rozložené (cievky založené v drážkach na obode vzduchovej medzery) alebo vo forme cievok nasunutých na vyjadrených póloch rozmiestnených po obode vzduchovej medzery. Namiesto pólov s cievkami sa používajú i permanentné magnety.

Trojfázové vinutia bývajú spojené do hviezdy (Y), kde konce všetkých fáz tvoria spoločný uzol a ich začiatky sa pripájajú na fázy zdroja U, V, W alebo do trojuholníka (Δ), kde koniec predchádzajúcej fázy vinutia je spojený so začiatkom nasledujúcej fázy vinutia a uzly sa pripájajú k fázam zdroja. Pri spojení do hviezdy platí, že prúd fáz I_f a prúd sieťových prívodov I_s sú vo vzťahu $I_f = I_s$; napätie fáz U_f a sieťové napätie U_s vo vzťahu $U_f = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot U_s$. Pri spojení do trojuholníka platí

$$I_f = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot I_s ; U_f = U_s. [4]$$

2.1 POHYBOVÁ ROVNICA ELEKTRICKÉHO MOTORA

Pre pohyb elektrického motora platí všeobecne pohybová rovnica. Pohybová rovnica motoru vystihuje vzájomné pôsobenie elektrického pohonu a hnaného

mechanizmu. Vychádza z (Lagrangeovho-) D'Alembertovho princípu, podľa ktorého je teleso rotujúce okolo stálej osi v dynamickej rovnováhe, ak je výslednica všetkých momentov pôsobiacich na teleso nulový vektor

$$\sum_{i=1}^n M_i + M_d = 0 \quad (2.1.1)$$

kde $\sum_{i=1}^n M_i$ je súčet hnacích a záťažových momentov a M_d je dynamický moment.

Pri translačnom pohybe telesa obdobne platí pre sily

$$\sum_{i=1}^n F_i + F_d = 0 \quad (2.1.2)$$

kde $\sum_{i=1}^n F_i$ je súčet hnacích a záťažových síl a F_d je dynamická sila. [1]

2.2 SYNCHRÓNNY ELEKTRICKÝ MOTOR

Synchrónny elektromotor sa vyskytuje v širokom rozsahu výkonov (od zlomkov W až po 15 MW i viac). Od asynchrónnych pohonov sa odlišuje tým, že má stále otáčky.

Uhlová rýchlosť synchrónneho motora (synchrónna rýchlosť ω_s) nezávisí na záťaži až do jej maximálnej povolenej hodnoty. Po jej prekročení vypadne motor zo synchrónneho chodu, zastaví sa a zo siete odoberá prúd nakrátko.

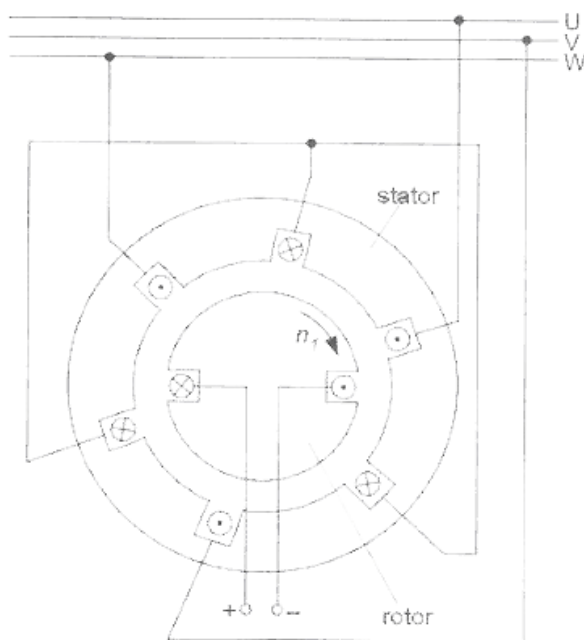
$$\omega_s = \frac{2\pi f_1}{p_p} \quad (2.2.1)$$

Synchrónny motor má väčšiu účinnosť η . Samostatne ani prostým pripojením na sieť sa nerozbehne – na vznik magnetického poľa je potrebný budič.

Kotva (stator) má obyčajne trojfázové vinutie, zriedkavejšie dvojfázové alebo jednofázové. Budenie zabezpečuje budiace vinutie magnetického kola (rotor), otáčajúce sa konštantnou synchrónnou rýchlosťou – u synchrónnych motorov budných rotorom. Budič je zdroj jednosmerného prúdu, rotačný alebo polovodičový. Môže byť namontovaný priamo na hriadeli – výhodné

pri rýchlobežných motoroch, alebo na zvláštnom budiacom agregáte – pri pomalobežných motoroch. [2] Rotor môže byť s vyjadrenými pólmi (asi do 1500 ot./min) alebo hladký (nad 1500 ot./min). [12] Hladký rotor je cylindrický, s budiacim vinutím vloženým v drážkach. U rotora s vyjadrenými pólmi je budiace vinutie sústredne navinuté na jadrách pólov. [2] Stator je skladaný z plechov. Póly sú liate alebo skladané z plechov. U liatych pólov sa tlmiace vinutie nepoužíva. Pólové nadstavce skladané z plechov majú tlmiace vinutie z medených, mosadzných alebo železných tyčí, ktoré sú po oboch stranách pólov spojené kruhmi (vinutie nakrátko), ktoré tlmí kývanie motora. Ak je tlmiace vinutie z odporových materiálov, môže slúžiť na asynchrónny rozbeh motora.

Synchrónny motor môže vyvinúť točivý moment, len ak sa magnetické polia statora a rotora vzájomne nepohybujú, teda ak sa rotor otáča synchrónne s poľom v statore. Magnetické pole statora má vždy maximálne synchrónne otáčky, lebo je napájané zo siete. Keď sa motor otáča podsynchrónnymi otáčkami, obe polia sa vzájomne pohybujú a motor nevyvinie rovnomerný točivý moment.



Obr. 2.1. Principiálna schéma synchrónneho motora (rotačného) s hladkým rotorom [4]

3. LINEÁRNÝ POHON

Lineárny motor je druh asynchrónneho alebo synchrónneho stroja, ktorý priamo vytvára priamočiary pohyb. Prvý motor tohto typu zostrojil profesor Eric Laithwaite. [5] Lineárny motor sa dá opísať ako klasický synchrónny alebo asynchrónny motor, ktorého stator rozrežeme v radiálnej rovine, a potom ho rozvineme ako na Obr. 3.1. Magnetické pole sa bude potom pohybovať vo vzduchovej medzere pozdĺž statora a účinkom elektromagnetickej sily sa bude rotor (jazdec) pohybovať v priamom smere. [3]

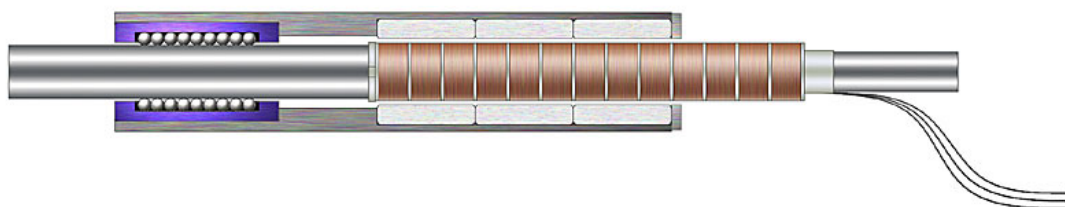
Rotor sa skladá z cievok v epoxidovom zapuzdrení, zariadení na princípe Hallovho javu, termistora a elektrických spojení. Stator (track) tvoria magnety na oceli. Tvorí lineárnu vodiacu koľajnicu, ktorá udržiava rotor v magnetickom poli statora. Na rozdiel od rotačných motorov nepotrebuje teda rotačné ložiská. Rotor a stator nemajú žiadne mechanické spojenie. Na meranie pozície rotora sa používajú diferenciálne lineárne enkodéry. Ich výhoda spočíva v tom, že merajú priamo polohu záťaže, čím prispievajú k zvýšeniu presnosti. [3]

Stator lineárnych motorov sa spravidla označuje ako primárny diel a rotor ako sekundárny diel. Lineárne synchrónne motory s permanentnými magnetmi (ďalej LM s PM) majú oproti primárnemu dielu konštrukčne usporiadanú sekundárnu časť tvorenú permanentnými magnetmi z kovov vzácnych zemín (Nd-Fe-B – neodým-železo-bór), ktoré sú nalepené na oceľovú podložku. Použitie indukčných lineárnych motorov sa obmedzuje na menej náročné aplikácie, kde má význam predovšetkým jednoduchosť a robustnosť stavby motora, napr. neštandardné prevádzkové prostredie, vlhké, znečistené, teplé, kde vzniká možnosť mechanického poškodenia stroja. Asynchrónna verzia má sekundárny diel vytvorený klieťkou nakrátko uloženú buď do drážok feromagnetického zväzku, alebo pripevnenú na oceľovú podložku. [11]

Lineárne motory obyčajne fungujú s pohyblivým rotorom a stálym statorom, možná je však i opačný variant. Výhodou prvého usporiadania je pomerne nízka hmotnosť rotora, nevýhodou zvýšené nároky na mechanickú odolnosť káblového systému.

Lineárny motor je možné riadiť podobnými metódami ako rotačný. Moment sa u lineárnych motorov vyjadruje v [N], rýchlosť v $[m.s^{-1}]$. [3]

Pomocou lineárneho motoru je možné dosiahnuť vyššiu presnosť a opakovateľnosť pozície. Pružnosť a vôľa súčastí sú nízke, systém je tuhý. Je možné dosiahnuť vysoké rýchlosti ($5 m.s^{-1}$) a zrýchlenia (5g). Vďaka absencii mechanického kontaktu nedochádza k opotrebovaniu a nevyžaduje sa mazanie. [5]



Obr. 3.1. Lineárny motor, znázornenie statoru a jazdca. [9]

3.1 POROVNANIE LINEÁRNYCH POHONOV S ROTAČNÝMI POHONMI VYBAVENÝMI PREVODOVKOU NA TRANSLAČNÝ POHYB

Výhody lineárneho pohonu oproti rotačným motorom s prevodovkou:

- vyššia dynamika a väčší rozsah regulácie,
- väčšie rýchlosti posuvu,
- vyššia presnosť polohovania,
- možnosti klasických rotačných motorov s mechanickým prevodom z rotačného pohybu na lineárny sú na hraniciach možností daných pružnosťou, mechanickými vôľami a postupným opotrebovaním,
- takmer bezporuchová prevádzka,
- prevádzka s lineárnymi motormi nie je nebezpečná pre životné funkcie obsluhy z hľadiska EMC.

Nevýhody lineárních motorů s permanentními magnety:

- s delší dráhou je dražší než rotační motor s převodovkou s porovnatelným výkonem,
- nutnost řešit relativně velké příťažlivé síly mezi primárním a sekundárním dílem,
- potřeba zabezpečit mechanické vedení a přívod energie primární části lineárního motoru. [11]

Vďaka svojim prednostiam lineárne motory prenikajú do oblasti vysokorychlostných obrábacích strojov, napr. frézovacie centrá, vertikálne obrábacie centrá, univerzálne sústruhy, prestrihovacie stroje, energolúčové rezacie stroje. Záujem o lineárne motory s permanentnými magnety rastie najmä u výrobcov strojov na elektroerozívne opracúvanie, polohovacích a manipulačných mechanizmov. Bežné sú ako pohony na osadzovacie stroje a polygrafickú techniku. LM s PM bez železa sa uplatňujú tam, kde je potrebný presný pohyb malých hmôt s veľkým počtom taktov a kde musí výrobný proces prebiehať dlhodobo vo vysokej a opakovateľnej kvalite. Z týchto dôvodov sa do budúcnosti predpokladá ročný nárast predaja lineárnych pohonov o 20-30 %. [11]

3.2 TYPY LINEÁRNYCH MOTOROV

Podľa princípu činnosti a konštrukcie rozdeľujeme lineárne motory do týchto kategórií:

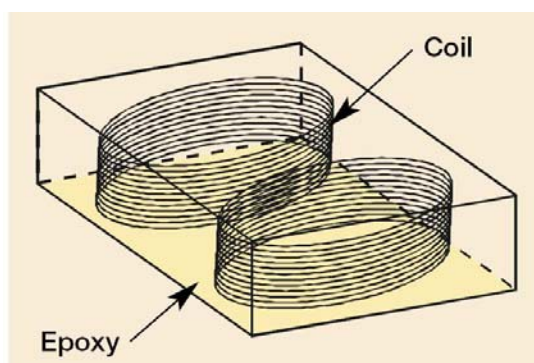
1. jednosmerné,
2. asynchrónne striedavé,
3. synchrónne striedavé:
 - a. so satorom bez feromagnetických materiálov,
 - b. so satorom s feromagnetickými materiálmi.

Medzi obvykle používané tvary konštrukcie lineárneho motoru patria cylindrický, s profilom U (U Channel) a plochý.

3.2.1 Cylindrický lineárny motor (Cylindrical moving magnet linear motor)

Rotor je kruhovitého tvaru a pohybuje tyč so zabudovanými magnetmi. Vinutie cievok pozostáva väčšinou z troch fáz s bezkartáčovou komutáciou využívajúcou prvky na princípe Hallovhov javu. Nie je vhodný pre použitie v oblastiach citlivých na únik magnetického toku. [5]

3.2.2 Lineárny motor s profilom U (U Channel linear motor)



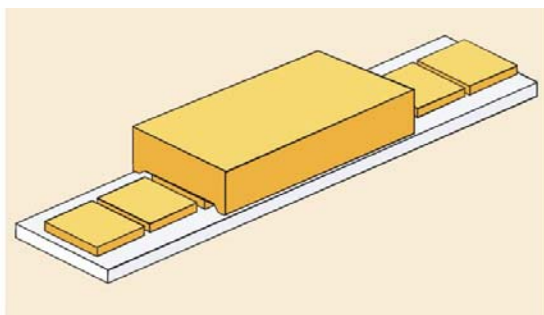
Obr. 3.2. U Channel linear motor, rotor [5]

Pozostáva z dvoch rovnobežných magnetických koľajníc postavených proti sebe. Medzi nimi sa pohybuje rotor, ktorý je podopieraný systémom ložísk. Rotor neobsahuje železo, a teda sa neuplatňuje magnetická sila medzi rotorom a statorom. Je ľahký, čo umožňuje vysoké zrýchlenia. Po pridaní chladenia sa výkon motoru zvýši. Vhodný pre aplikácie citlivé na únik magnetického toku, keďže magnety sú obrátené proti sebe a tienené. Tento typ umožňuje spojenie viacerých motorov a predĺženie novej dráhy, ktorá bude obmedzená iba dĺžkou káblového systému a enkodérom. [5,6]

3.2.3 Ploché lineárny motor (Flat type linear motor)

Ploché lineárne motory sa najčastejšie vyrábajú ako bezdrážkové motory s bázou bez železa (slotless ironless), bezdrážkové s bázou zloženou z vrstvenej

ocele a hliníka (slotless iron) a drážkové s vrstvenou bázou (slotted iron). Všetky typy sú komutované bezkartáčovo.

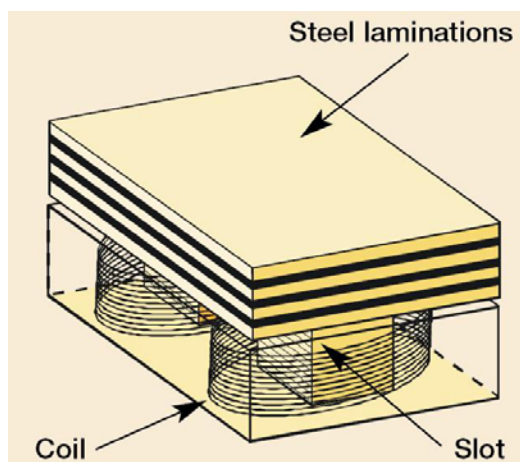


Obr. 3.3. Flat type linear motor [5]

Bezdrážkové lineárne motory s bázou bez železa (slotless ironless) sa skladajú z cievok nasadených na hliníkovú podložku. Vďaka neprítomnosti železa v rotore nepôsobí žiadna magnetická sila. Vhodné tam, kde sú požiadavky na plynulú a hladkú reguláciu rýchlosti (skenovanie). Avšak výstupná sila je najmenšia z plochých motorov.

Bezdrážkové lineárne motory s bázou zloženou z vrstvenej ocele a hliníka (slotless iron) sa podobajú predchádzajúcemu typu, avšak cievky sú nasadené na vrstvu ocele, a tá na hliníkovú podložku. Vrstva ocele slúži na usmernenie magnetického poľa a na zosilnenie výstupnej sily. V tomto type sa vyskytuje magnetická príťažlivá sila medzi rotorom a statorom. Je úmerná výstupnej sile motoru.

Drážkové lineárne motory s vrstvenou bázou (slotted iron) obsahujú cievkové vinutia usporiadané pomocou oceľovej konštrukcie do cievkovej súpravy. Železné jadro výrazne zväčšuje výstupnú silu motora tým, že sústreďuje magnetické pole vytvorené vinutím. Príťažlivá sila medzi rotorom a statorom je už značná, čo sa dá využiť ako predbežné zaťaženie pre ložiskový systém, avšak prináša so sebou i opotrebovanie. [5]



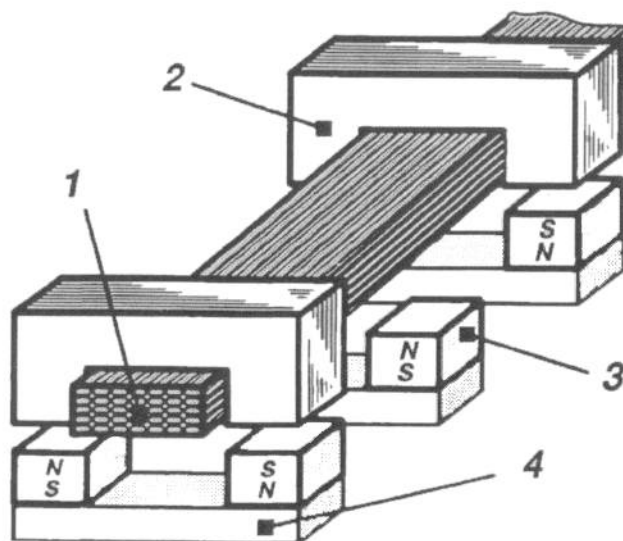
Obr. 3.4. Slotted iron flat motor [5]

3.2.4 Lineárny synchrónny motor s permanentnými magnetmi (Linear permanent magnet synchronous motor, LPMSM)

Lineárny synchrónny motor je motor, v ktorom je priamočiary pohyb v synchronizme s magnetickým poľom, t.j. posuvná rýchlosť je rovnaká ako rýchlosť pohybujúceho sa magnetického poľa. Ťahová sila je generovaná buď ako produkt mnohofázového vinutia a poľa magnetických pólov N, S, ... N, S alebo feromagnetického statora s premenlivým magnetickým odporom; alebo ako dôsledok magnetického poľa vytváraného elektronicky prepínanými jednosmernými vinutiami.

Striedavé mnohofázové synchrónne motory sú obvykle vybavené jednosmerným elektromagnetickým buđením. Namiesto jednosmerných elektromagnetov sa často používajú permanentné magnety. Tieto sa vyskytujú v dvoch variantoch: motory, v ktorých sú vstupné prúdové krivky sínusoidné a generujú posúvajúce sa magnetické pole; a jednosmerné lineárne bezkartáčové pohony so spätnou väzbou od pozície, ktorých vstupné krivky sú obdĺžnikové alebo lichobežníkové a sú zosynchronizované s rýchlosťou a polohou rotora.

Permanentné magnety sa môžu vyskytovať v statore (reaction rail) alebo v rotore (passive reaction rail). [6]



Obr. 3.5. Lineárny synchronný motor s permanentnými magnetmi a priečnym magnetickým tokom [6]. 1-vinutie kotvy, 2-vrstvené jadro kotvy, 3-permanentný magnet, 4-spätné feromagnetické jadro.

4. MATEMATICKÝ POPIS ELEKTRICKÉHO POHONU

4.1 PARKOVA LINEÁRNA TRANSFORMÁCIA ROVNÍC (PARK'S TRANSFORMATION)

Na symetrickom stroji zapojenom do Y alebo Δ bez vyvedeného stredú môžeme uskutočniť Parkovu lineárnu transformáciu rovníc, ktorá umožňuje zameniť pevný dvojdimenzionálny súradnicový systém za pohyblivý. Ak v určitom okamihu zobrazíme okamžité hodnoty fázorov prúdov jednotlivých fáz statora a, b, c, zložíme ich a normujeme, dostaneme pre priestorový vektor (=komplexor) prúdu statora vzťah

$$\hat{i}_1 = \frac{2}{3} \cdot (i_a + a \cdot i_b + a^2 \cdot i_c) \quad (2.3.1)$$

kde $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$.

Platí

$$\hat{i}_s^K = \hat{i}_s \cdot e^{-j\theta_K} = i_{sx}^K + j \cdot i_{sy}^K \quad (2.3.2)$$

$$\hat{i}_s = \hat{i}_s^K \cdot e^{j\theta_K} = i_{s\alpha} + j \cdot i_{s\beta} \quad (2.3.3)$$

Pre transformáciu veličín zo súradnicového systému (α, β) do systému (x, y) , t.j. $(\alpha, \beta) \rightarrow (x, y)$

$$\begin{pmatrix} i_{sx}^K \\ i_{sy}^K \end{pmatrix} = D^{-1}(\theta_K) \cdot \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = D(-\theta_K) \cdot \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_K & \sin \theta_K \\ -\sin \theta_K & \cos \theta_K \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} \quad (2.3.4)$$

Pre spätnú transformáciu $(x, y) \rightarrow (\alpha, \beta)$ platí

$$\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_K & -\sin \theta_K \\ \sin \theta_K & \cos \theta_K \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_{sx}^K \\ i_{sy}^K \end{pmatrix} = D(\theta_K) \cdot \begin{pmatrix} i_{sx}^K \\ i_{sy}^K \end{pmatrix} \quad (2.3.5)$$

[2]

Pozn.: V inej literatúre sa bežne používa namiesto nového systému (x, y) systém (d, q) a príslušné transformačné rovnice sa zapisujú pre všeobecnú veličinu x v tvare [1]

$$\begin{pmatrix} x_d \\ x_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{pmatrix} \quad (2.3.6)$$

$$\begin{pmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_d \\ x_q \end{pmatrix} \quad (2.3.7)$$

4.2 CLARKOVA LINEÁRNA TRANSFORMÁCIA ROVNÍC (CLARK'S TRANSFORMATION)

Vyjadruje transformáciu zo súradnicového systému (a, b, c) do systému (α , β , γ) vektoru prúdu alebo napätia. Nazýva sa i transformácia $2 \rightarrow 3$ (alebo $3 \rightarrow 2$). Ak máme vektor prúdu

$$i_{abc} = (i_a \quad i_b \quad i_c)^T \quad (2.4.1)$$

Potom platí

$$\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_\gamma \end{pmatrix} = T \cdot \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (2.4.2)$$

Kde T^T je ortonormálna báza nového trojdimenzionálneho priestoru.

Ak si stanovíme podmienku

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2.4.3)$$

z ktorej vyplýva, že $i_\gamma = 0$, znamená to, že sa bude vektor i_{abc} premietat' z trojrozmerného priestoru do roviny, teda redukciu o jednu dimenziu. Nakoľko rovnica transformácie pre i_γ presne znie

$$i_\gamma = \frac{1}{\sqrt{3}}i_a + \frac{1}{\sqrt{3}}i_b + \frac{1}{\sqrt{3}}i_c \quad (2.4.5)$$

ide v skutočnosti o aritmetický priemer zložiek pôvodného trojrozmerného vektora násobený určitým koeficientom.

Keďže zložka γ je nulová za platnosti (2.20), zredukujú sa vzťahy pre priamu a inverznú Clarkovu transformáciu $(a, b, c) \rightarrow (\alpha, \beta)$, (a opačne), na

$$\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = T_{red} \cdot \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (2.4.6)$$

$$\begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = T_{red}^T \cdot \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} \quad (2.4.7)$$

Napríklad ak máme tri zložky vektora fázovo posunuté vzájomne o $\frac{2\pi}{3}$:

$$i_a = I \cdot \sin(\omega t), \quad i_b = I \cdot \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right), \quad i_c = I \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.4.8)$$

Tieto sa použitím Clarkovej transformácie zredukujú na

$$i_\alpha = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I \cdot \sin(\omega t), \quad i_\beta = -\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I \cdot \cos(\omega t) \quad (2.4.9)$$

[2]

4.3 MATEMATICKÝ POPIS SYNCHRÓNNEHO MOTORA

Synchrónny motor je možno opísať ako systém s trojfázovými vinutiami statoru a, b, c a rotor s budiacim vinutím B a tlmiacimi vinutiami na rotore D a Q, ktoré sú nakrátko. Budeme predpokladať, že motor je napájaný súmerným trojfázovým harmonickým napätím a vinutia fáz sú priestorovo symetricky rozložené v drážkach statora a rotora. Ďalej sa predpokladá, že rozloženie magnetickej indukcie B vo vzduchovej medzere je harmonické. Straty v železe sa zanedbávajú. Reálne statorové vinutie zapojené do Y nemá vyvedenú 0. Ak zanedbáme tlmiace vinutia D, Q, situácia sa ďalej zjednoduší.

Podľa [1] je možné odvodiť model motora nasledujúcim spôsobom.

Predpokladáme trojfázový systém so statorovými veličinami u_{1a} , u_{1b} , u_{1c} a i_{1a} , i_{1b} , i_{1c} a rotorovými i_{2a} , i_{2b} , i_{2c} . Rotorové vinutia sú spojené nakrátko a sú posunuté oproti statorovému vinutiu o uhol

$$\vartheta = \int_0^t \omega dt + \vartheta_0 \quad (4.3.1)$$

Rovnaké točivé magnetické pole možno vytvoriť aj dvojfázovým systémom s veličinami u_{1d} , u_{1q} , i_{1d} , i_{1q} a i_{2d} , i_{2q} , kde obidve fázy statora (alebo rotora) zvierajú uhol 90° . Posun o 90° sa dá vyjadriť pomocou jednotkovej imaginárnej zložky $j = e^{j\frac{\pi}{2}}$. Dvojfázový systém je možné potom nahradiť jedinou komplexnou fázou na statore a rotore, pre ktorú platí

$$u_1^S = u_{1d} + ju_{1q} \quad (4.3.2a,b,c)$$

$$i_1^S = i_{1d} + ji_{1q}$$

$$i_2^R = i_{2d} + ji_{2q}$$

Indexy S, R znamenajú, že veličiny sú spojené s ortogonálnym Gaussovým súradnicovým systémom statora, rotora. Pomocou vyššie uvedenej úvahy môžeme prejsť z reálneho trojfázového systému na fiktívny komplexný jednofázový.

Pre napätia trojfázového systému v ustálenom stave $\omega_1 = 2\pi f_1 = \text{const.}$ platia vzťahy

$$\begin{aligned} u_a &= U_{am} \cos(\omega_1 t) \\ u_b &= U_{am} \cos\left(\omega_1 t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ u_c &= U_{am} \cos\left(\omega_1 t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (4.3.3)$$

Komplexory napätí jednotlivých fáz

$$\begin{aligned} \hat{u}_a &= U_{am} e^{j0} e^{j\omega_1 t} = \hat{U}_{am} e^{j\omega_1 t} \\ \hat{u}_b &= U_{bm} e^{j\frac{2\pi}{3}} e^{j\omega_1 t} = \hat{U}_{bm} e^{j\omega_1 t} \\ \hat{u}_c &= U_{cm} e^{-j\frac{2\pi}{3}} e^{j\omega_1 t} = \hat{U}_{cm} e^{j\omega_1 t} \end{aligned} \quad (4.3.4)$$

kde \hat{U}_{am} , \hat{U}_{bm} , \hat{U}_{cm} sú fázory, rotujúce uhlovou rýchlosťou ω_1 .

Priestorový komplexor napätí trojfázového systému v súradnicovom systéme S bude

$$\hat{u}^S = K \cdot (u_a + \hat{a}u_b + \hat{a}^2u_c) \quad (4.3.5)$$

K je konštanta, ktorá sa zvyčajne volí $K = 2/3$. Amplitúdy všetkých fáz sú rovnaké $U_{am} = U_{bm} = U_{cm}$, a predchádzajúca rovnica sa dá prepísať do tvaru, ktorý vyjadruje tvrdenie, že komplexor je fázor, otáčajúci sa uhlovou rýchlosťou ω_1 . Obdobné vzťahy je možné napísať aj pre komplexor prúdov statora a rotora.

$$\hat{u}^S = \frac{2}{3} \hat{U}_m \frac{2}{3} e^{j\omega_1 t} = \hat{U}_m e^{j\omega_1 t} \quad (4.3.6)$$

Aj dvojfázový statorový systém α , β môže vytvoriť točivé magnetické pole. Pre komplexor statorového napätia (ako aj pre prúdy) platí

$$\hat{u}^S = u_\alpha^S + j \cdot u_\beta^S \quad (4.3.7)$$

Ak prejdeme na náhradné fiktívne vinutia d , q spojené so systémom rotora, transformujeme statorové veličiny dvojfázového systému spojeného so súradnicovým systémom statora podľa

$$\hat{u}^R = \hat{u}^S e^{-j\vartheta} \quad (4.3.8)$$

Pri otáčaní rotoru, pri premenlivom uhle ϑ medzi statorom a rotorom, sa mení magnetická väzba medzi vinutiami statoru a rotoru.

$$\vartheta = \int_0^t \omega dt + \vartheta_0 \quad (4.3.9)$$

Medzi d , q a rotorovými vinutiami existuje pevná magnetická väzba.

Komplexor statorového napätia v rotorovom súradnicovom systéme možno rozložiť na jednu zložku v smere osi d a druhú zložku v smere osi q podľa

$$\hat{u}^R = u_d + j \cdot u_q \quad (4.3.10)$$

pričom platí, že

$$u_d = \hat{u}_\alpha^S \cdot \cos \vartheta + \hat{u}_\beta^S \cdot \sin \vartheta \quad (4.3.11)$$

$$u_q = -\hat{u}_\alpha^S \cdot \sin \vartheta + \hat{u}_\beta^S \cdot \cos \vartheta$$

Z predchádzajúcich vzťahov (2.5.7, 8, 9) vyplýva, že

$$u_d + j \cdot u_q = \hat{u}^R = \hat{u}^S e^{-j\theta} = \frac{2}{3} \cdot \left(u_a + u_b e^{-j\frac{2\pi}{3}} + u_c e^{j\frac{2\pi}{3}} \right) \cdot e^{-j\theta} \quad (4.3.12)$$

Pre komplexor napätia statoru v súradnicovom systéme rotora píšeme pre dvojpólový stroj

$$\hat{u}^R = u_d + j \cdot u_q = R \cdot (i_d + j \cdot i_q) + \frac{d}{dt} (\psi_d + j \psi_q) + j\omega \cdot (\psi_d + j \psi_q) \quad (4.3.13)$$

Postupne ako v [1] sa dá odvodiť pre zložky komplexora statorového napätia v rotorovom súradnicovom systéme

$$u_d = R \cdot i_d + \frac{d}{dt} \psi_d - \omega \psi_q \quad (4.3.14)$$

$$u_q = R \cdot i_q + \frac{d}{dt} \psi_q - \omega \psi_d \quad (4.3.15)$$

Pre budiace vinutie B platí

$$u_B = R_B \cdot i_B + \frac{d}{dt} \psi_B \quad (4.3.16)$$

A pre spriahnuté magnetické toky ψ_d, ψ_q v osiach d, q

$$\psi_d = L_d \cdot i_d + L_{dB} \cdot i_B \quad (4.3.17a)$$

$$\psi_q = L_q \cdot i_q \quad (4.3.17b)$$

kde L_d, L_q, L_B sú vlastné indukčnosti statorového a budiaceho vinutia v osiach d, q ; L_{dB} je vzájomná indukčnosť statorového a budiaceho vinutia v smere pozdĺžnej osi.

Pre elektromagnetický moment platí rovnako ako pri asynchrónnom motore

$$M = \frac{3}{2} \cdot \frac{P_p}{\omega_1} \cdot \operatorname{Re} \{ -j \omega_1 \hat{\psi} * \hat{i} \}$$

$$M = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot (\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d) \quad (4.3.19)$$

kde p_p je počet pólových dvojíc motoru, ω_1 je rýchlosť rotácie komplexoru statorového prúdu.

Pohybová rovnica

$$M - M_z = \frac{J}{p_p} \cdot \frac{d}{dt} \omega = J \cdot \frac{d}{dt} \omega_m \quad (4.3.20)$$

kde $\omega_m = \frac{\omega}{p_p}$ je uhlová rychlost $2p_p$ pólového motoru a ω je uhlová rychlost

dvoj pólového motoru.

Rovnice (4.3.13 až 20) představují matematický model synchronního motoru (s ohledem na zanedbané tlmiace vinutia).

Předpokládáme motor s permanentním magnetem. Spriahnuté magnetické toky $\psi_{d,q}$ prepíšeme tak, že budiace vinutie B (rovnica 4.3.16) nahradíme konštantou elektromotorickej sily K_E

$$\psi_d = L_d \cdot i_d + K_E \quad (4.3.21)$$

$$\psi_q = L_q \cdot i_q$$

Dosadíme (4.3.21) do (4.3.14 a 4.3.15)

$$u_d = R i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - L_q \omega i_q \quad (4.3.22)$$

$$u_q = R i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + L_d \omega i_d + K_E \omega \quad (4.3.23)$$

Vyjadríme časové derivácie prúdov

$$\frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} \cdot u_d - \frac{R}{L_d} \cdot i_d + \frac{L_q}{L_d} \cdot \omega i_q \quad (4.3.24)$$

$$\frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} \cdot u_q - \frac{R}{L_q} \cdot i_q - \frac{L_d}{L_q} \cdot \omega i_d + \frac{K_E}{L_q} \cdot \omega \quad (4.3.25)$$

Ďalej dosadíme (4.3.21) do (4.3.19)

$$M = \frac{3}{2} p_p [(L_d - L_q) i_d i_q + K_E i_q] \quad (4.3.26)$$

A predchádzajúcu rovnicu do (4.3.20)

$$\frac{d}{dt} \omega = \frac{1}{J} \cdot \frac{3}{2} p_p \cdot (L_d - L_q) \cdot i_d i_q + \frac{1}{J} \cdot \frac{3}{2} p_p \cdot K_E \cdot i_q - \frac{1}{J} \cdot M_z \quad (4.3.27)$$

$$\frac{d}{dt} \theta = \omega \quad (4.3.28)$$

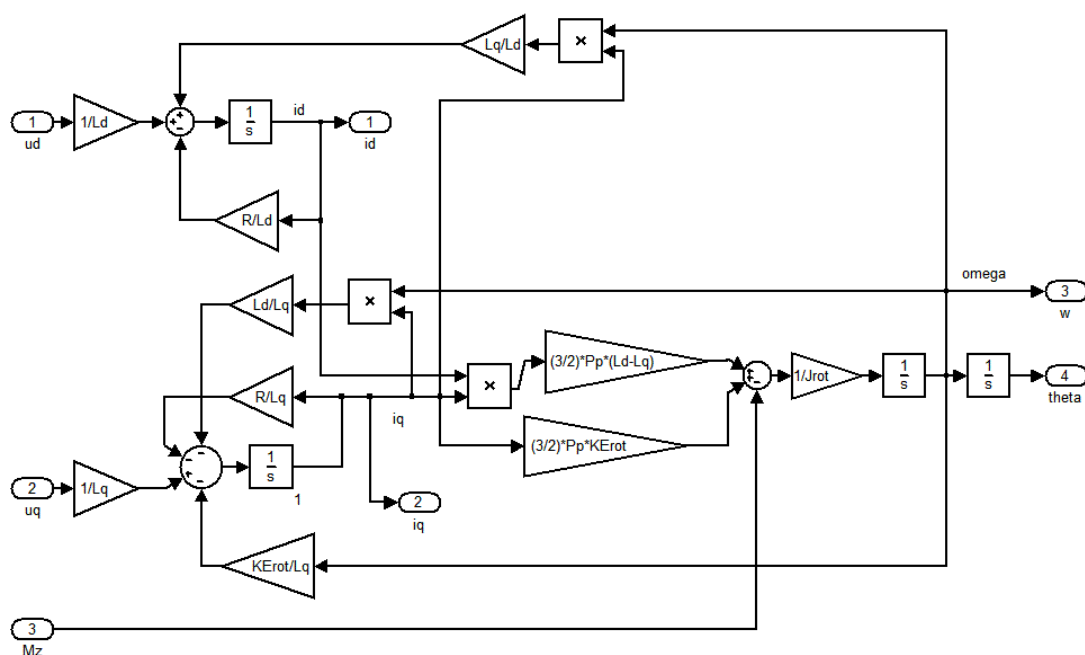
Rovnica (4.3.27) je stavová rovnica uhlového natočenia rotora. Rovnice (4.3.24, 4.3.25, 4.3.27 a 4.3.28) sú stavové rovnice modelu motoru. [1]:

$$\frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} \cdot u_d - \frac{R}{L_d} \cdot i_d + \frac{L_q}{L_d} \cdot \omega i_q \quad (4.3.24)$$

$$\frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} \cdot u_q - \frac{R}{L_q} \cdot i_q - \frac{L_d}{L_q} \cdot \omega i_d + \frac{K_E}{L_q} \cdot \omega \quad (4.3.25)$$

$$\frac{d}{dt} \omega = \frac{1}{J} \cdot \frac{3}{2} p_p \cdot (L_d - L_q) \cdot i_d i_q + \frac{1}{J} \cdot \frac{3}{2} p_p \cdot K_E \cdot i_q - \frac{1}{J} \cdot M_z \quad (4.3.27)$$

$$\frac{d}{dt} \theta = \omega \quad (4.3.28)$$



Obr. 4.1. Schéma modelu motora podľa stavových rovníc.

4.4 DECOUPLING

V stavových rovniciach sa vyskytuje násobenie signálov i_d , i_q , ω . Na odstránenie ťažko riešiteľných nelinearit použijeme

$$u_{d2} = u_{d1} - L_q \cdot \omega \cdot i_q \quad (4.4.1)$$

$$u_{q2} = u_{q1} + L_d \cdot \omega \cdot i_d + K_E \cdot \omega \quad (4.4.2)$$

Tieto vzťahy dosadíme do (4.3.22 a 4.3.23), pričom položíme $u_d = u_{d2}$, $u_q = u_{q2}$. Dostaneme lineárne rovnice

$$u_{d1} = Ri_d + L_d \frac{d}{dt} i_d \quad (4.4.3)$$

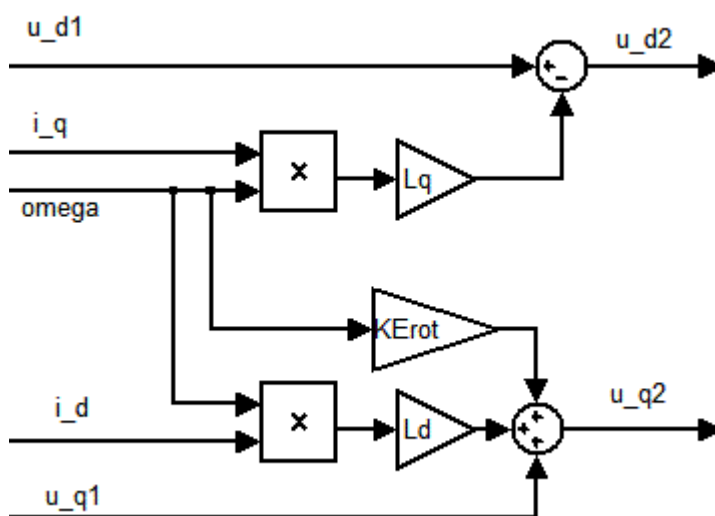
$$u_{q1} = Ri_q + L_q \frac{d}{dt} i_q \quad (4.4.4)$$

Vyjadríme prúdy a získame prvé dve stavové rovnice motora ako lineárne

$$\frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} \cdot u_{d1} - \frac{R}{L_d} \cdot i_d \quad (4.4.5)$$

$$\frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} \cdot u_{q1} - \frac{R}{L_q} \cdot i_q \quad (4.4.6)$$

[6]



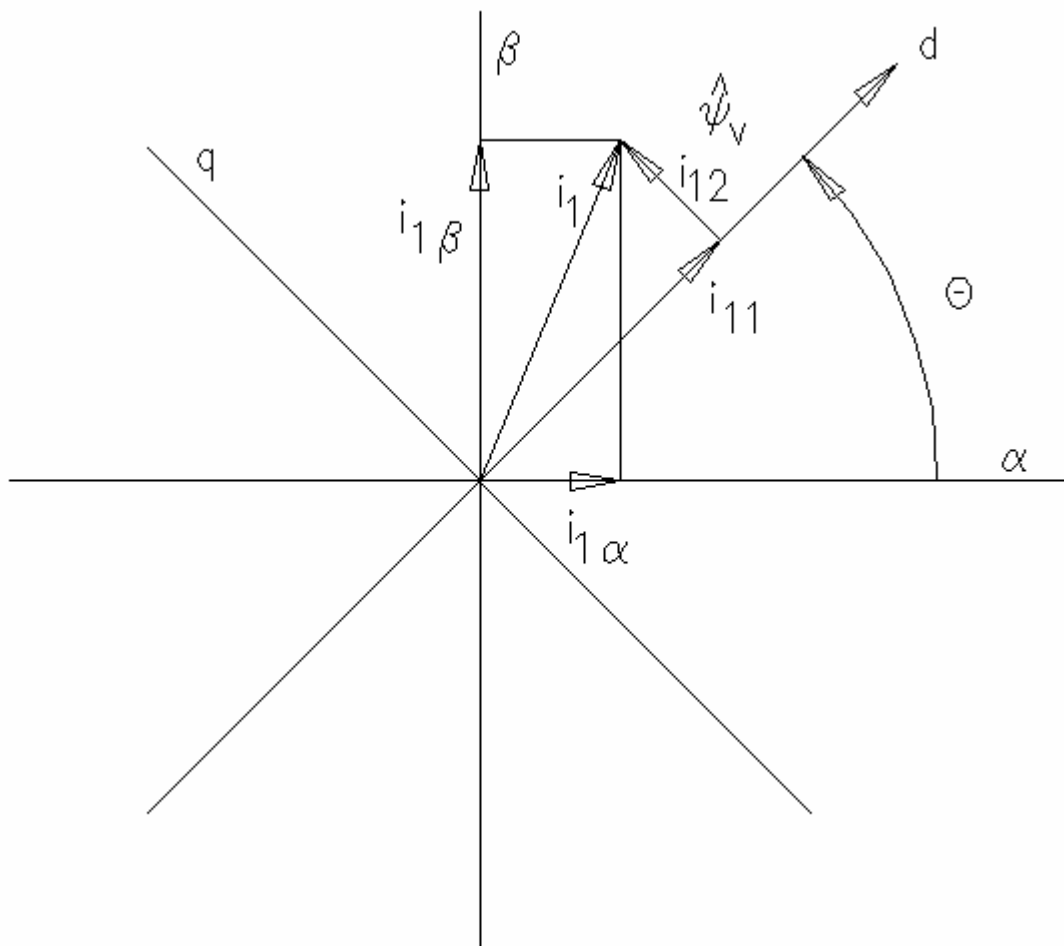
Obr. 4.2. Všeobecná schéma decouplingu.

4.5 VEKTOROVO ORIENTOVANÉ RIADENIE POHONU (SPACE VECTOR CONTROL)

Regulácia s vektorovým riadením motora predstavuje najdokonalejší spôsob automatickej regulácie chodu pohonu. Princípom je samostatné riadenie dvoch zložiek prúdu komplexoru statorového prúdu \hat{i}_1 , z ktorých jedna zložka i_{11} je vo fáze s fázorom výsledného magnetického toku $\hat{\psi}_v$ a druhá zložka i_{12} je naň kolmá. [4]

Zložka i_{12} vytvára s absolútnou hodnotou $\hat{\psi}_v$ moment a činný výkon motoru. Zložka i_{11} vytvára magnetický tok a jalový výkon. Zmena jednej zložky sa dá uskutočniť nezávisle na druhej zložke. Môžeme teda osobitne riadiť moment a výsledný magnetický tok. [1]

V praxi sa táto regulácia uskutočňuje dvoma regulátormi. Prvý regulátor na základe žiadanej hodnoty točivého momentu reguluje zložku i_{12} komplexoru statorového prúdu \hat{i}_1 . Druhý regulátor udržiava žiadaný magnetický tok, a teda zložku i_{11} komplexoru \hat{i}_1 . Za oboma regulátormi sa nachádzajú bloky výpočtu žiadanej absolútnej hodnoty zložiek $i_{1\alpha}$ a $i_{1\beta}$ prúdového komplexora v súradnicovej sústave statora. Z tohto sa ďalej vypočítajú žiadané fázové prúdy statora. Predstavujú žiadané hodnoty pre ďalšie regulátory, ktoré kontrolujú frekvenčný menič, ktorý reguluje skutočné fázové prúdy vo fázach U, V, W tak, aby sa tieto svojou absolútnou hodnotou a fázou zhodovali so svojimi žiadanými hodnotami. V spätnej väzbe je zaradený člen, ktorý vyhodnocuje absolútnu hodnotu komplexora magnetického toku $\hat{\psi}_v$ a privádza ju k regulátoru hodnoty i_{11} . Je zavedená aj druhá spätná väzba, ktorá privádza nameranú rýchlosť otáčania motora k regulátoru zložky i_{12} . [4]



Obr. 4.3. Vektorové riadenie [4]. $\hat{\psi}_v$ je fázor magnetického toku motoru, \hat{i}_1 komplexor statorového prúdu so zložkami i_{11} a i_{12} v rotujúcej súradnicovej sústave magnetického toku d , q a $i_{1\alpha}$, $i_{1\beta}$ v pevnej súradnicovej sústave statoru α , β a θ je okamžitá uhlová poloha rotoru.

5. RIADENIE MOTORA

5.1 PARAMETRE LINEÁRNEHO MOTORA

Boli zvolené parametre lineárneho motora podľa nasledujúcej tabuľky.

Elektrické parametre	Hodnota	Poznámka
K_E (Line-Line) [V.s/m]	154,31	Konštanta spätnej elektromotorickej sily
R pri 25°C (Line-Line) [Ω]	13,6	Odpor vinutia
L_d (Line-Line) [mH]	12,0	Indukčnosť vinutia
L_q (Line-Line) [mH]	12,0	Indukčnosť vinutia
Mechanické parametre		
Dĺžka rotora [m]	0,382	
Hmotnosť rotora [kg]	3,40	
Dĺžka statora [m]	0,720	
Rozstup pólov [m]	0,030	
Maximálna teplota vinutia [°C]	125	
Výkonové parametre		
Menovitá sila [N]	577,2	

Tab. 5.1. Parametre zvoleného lineárneho motora.

5.2 PREPOČET LINEÁRNYCH PARAMETROV NA ROTAČNÉ A NASPÄŤ

Keďže fyzikálny model motora bol odvodený pre rotačný pohyb, prepočítame skúmané veličiny z rotačného pohybu na pohyb translačný. Parametre lineárneho motora prepočítané na svoje rotačné ekvivalenty sa použijú na simuláciu a výsledky tejto simulácie sa spätne prevedú na výstupné hodnoty zodpovedajúce translačnému pohybu.

Základom prevodu bude stanovenie prepočítavacieho polomeru r . Fyzická mechanická dĺžka rotora je 0,382 m a rozstup pólov 0,030 m. Z toho vyplýva, že rotor obsahuje 12 pólov ($0,382/0,030=12,73$). Elektrická dĺžka rotora bude teda

$$L = 12 \cdot 0,030 \text{ m} = 0,360 \text{ m}$$

Stator a rotor lineárneho motoru vznikli rozvinutím kruhového statora a rotora rotačného motoru. Preto L zodpovedá 2π rad.

$$r = \frac{L}{2\pi} \quad (5.2.1)$$

Translačnú rýchlosť v_t a posunutie d získame zo vzťahov

$$v_t = \omega \cdot r \quad (5.2.2)$$

$$d = \theta \cdot r \quad (5.2.3)$$

kde ω je uhlová rýchlosť a θ uhlové natočenie.

Spätnú elektromotorickú konštantu prepočítame z translačnej hodnoty K_{Etrans} na rotačnú hodnotu K_{Erot}

$$K_{Erot} = \frac{L}{2\pi} \cdot K_{Etrans} \quad (5.2.4)$$

Predpokladáme, že lineárny motor pri svojej činnosti premiestňuje určitú celkovú hmotnosť m_c , ktorá sa skladá z vlastnej hmotnosti rotora m_m a hmotnosti užitočnej záťaže m_z .

$$m_c = m_m + m_z \quad (5.2.5)$$

V rotačnom motore tomu zodpovedá moment zotrvačnosti J od všetkých hmôt, pohybujúcich sa v systéme, pre ktorý platí

$$J = m_c \cdot r^2 \quad (5.2.6)$$

Zátťažný moment M_z zohľadňuje iba hmotnosť záťaže m_z

$$M_z = m_z \cdot g \cdot r \quad (5.2.7)$$

kde g je gravitačné zrýchlenie ($g = 9,80665 \text{ m.s}^{-2}$).

Pri horizontálnom presune záťaže sa uplatňuje iba trenie v mechanických častiach, čo rešpektujeme zavedením koeficientu trenia 0,005, ktorým násobíme záťažný moment M_z .

5.3 VSTUPNÉ HODNOTY PRE SIMULÁCIU

Parametre označené Line-Line je potrebné pre účely zadania do simulácie upraviť vydelením 2-mi. Tým dostávame konštanty pre simulačný model.

Veličina	Hodnota	Poznámka
R [Ω]	6,8	Odpor vinutí statora
L_d [H]	$6 \cdot 10^{-3}$	Indukčnosť statora v zmere osi d
L_q [H]	$6 \cdot 10^{-3}$	Indukčnosť statora v zmere osi q
P_p [-]	6	Počet pólových dvojíc
Leng [m]	0,360	Elektrická dĺžka rotora
m_m [kg]	3,4	Hmotnosť rotora
K_{Etrans} [V.s/m]	77,155	Automaticky sa prepočítava na rotačný ekvivalent
$m_z \max$ [kg]	58,858	Maximálna hmotnosť záťaže
$d \max$ [m]	0,720	Maximálne translačné posunutie

Tab. 5.2. Konštanty simulačného modelu.

5.4 NÁVRH REGULAČNÉHO OBVODU

5.4.1 Bloková schéma

Model motora zodpovedá stavovým rovniciam (4.3.24), (4.3.25), (4.3.27) a (4.3.28).

$$\frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} \cdot u_d - \frac{R}{L_d} \cdot i_d + \frac{L_q}{L_d} \cdot \omega i_q \quad (4.3.24)$$

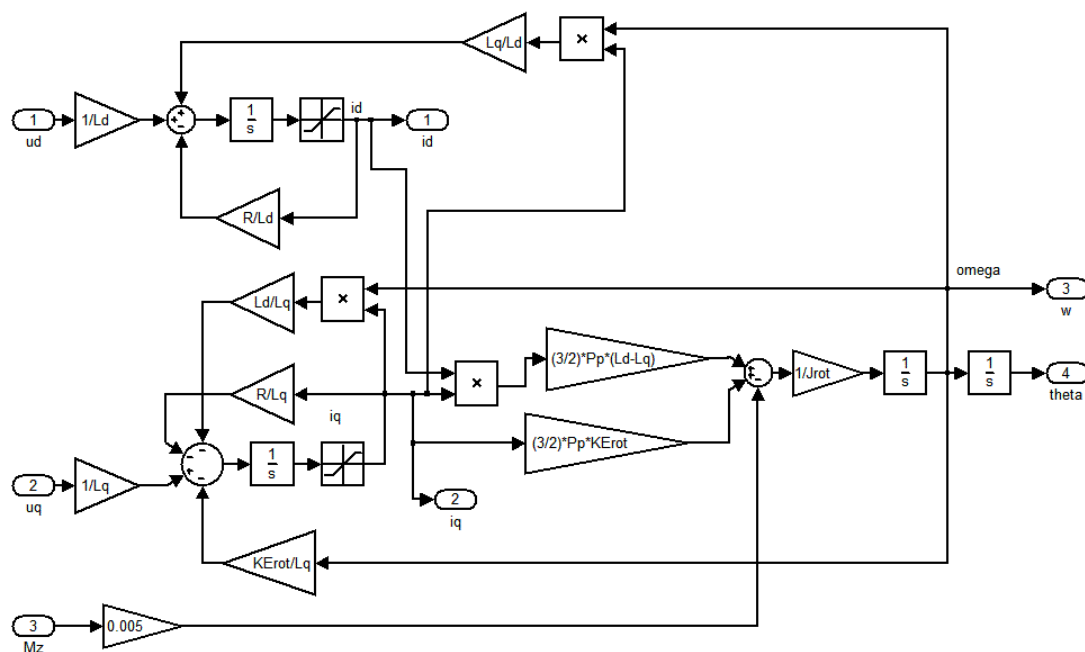
$$\frac{d}{dt}i_q = \frac{1}{L_q} \cdot u_q - \frac{R}{L_q} \cdot i_q - \frac{L_q}{L_d} \cdot \omega i_q + \frac{K_E}{L_q} \cdot \omega \quad (4.3.25)$$

$$\frac{d}{dt}\omega = \frac{1}{J} \cdot \frac{3}{2} p_p \cdot (L_d - L_q) \cdot i_d i_q + \frac{1}{J} \cdot \frac{3}{2} p_p \cdot K_E \cdot i_q - \frac{1}{J} \cdot M_z \quad (4.3.27)$$

$$\frac{d}{dt}\theta = \omega \quad (4.3.28)$$

Tento model je znázornený na Obr. 4.1.

Aby model motora viac zodpovedal realite, zaviedla som obmedzenia prúdov i_d , i_q . Ďalej, na simuláciu pohybu rotora v horizontálnej rovine som zaviedla koeficient trenia 0,005, ktorým násobím záťažný moment M_z . Výsledný stav znázorňuje Obr. 5.1.



Obr. 5.1. Model motora so zavedenými obmedzeniami prúdov i_d , i_q a koeficientom trenia

V danej regulovanej sústave použijeme reguláciu prúdov i_d , i_q , uhlovej rýchlosti ω a reguláciu uhlového natočenia θ .

Regulátor prúdov i_d , i_q navrhujeme ako PI v tvare

$$R_{id}(p) = K_{d1} \cdot \frac{(T_{d1}p + 1)}{p}, \text{ resp. } R_{iq}(p) = K_{q1} \cdot \frac{(T_{q1}p + 1)}{p} \quad (5.4.1a,b)$$

S použitím rovníc decouplingu prejdú stavové rovnice (4.3.24) a (4.3.25) na tvar

$$\frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} \cdot u_{d1} - \frac{R}{L_d} \cdot i_d \quad (4.4.5)$$

$$\frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} \cdot u_{q1} - \frac{R}{L_q} \cdot i_q \quad (4.4.6)$$

Z čoho sa dajú odvodiť prenosové funkcie

$$F_{id}(p) = \frac{I_d(p)}{U_{d_m}(p)} = \frac{1}{L_d \cdot p + R}$$

$$F_{iq}(p) = \frac{I_q(p)}{U_{q_m}(p)} = \frac{1}{L_q \cdot p + R} \quad (5.4.2a,b)$$

Je výhodné zvoliť predbežne nastavenie PI regulátorov prúdu tak, aby sa krátila nula regulátorov s pólom prenosov.

Regulátor uhlovej rýchlosti ω navrhujeme ako PID

$$R_{\omega}(p) = K_{\omega} \cdot \frac{(T_1p + 1)(T_2p + 1)}{p(\varepsilon p + 1)} \quad (5.4.3)$$

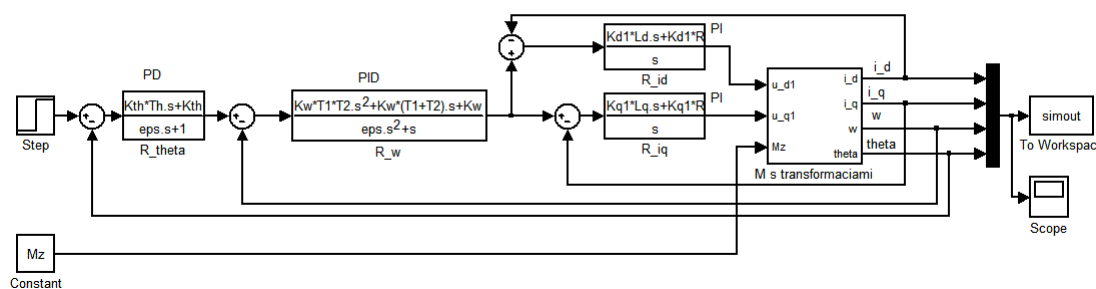
kde ε je realizačná časová konštanta, nastavená $\varepsilon = 0,001$ s.

Regulátor uhlového natočenia θ navrhujeme ako PD

$$R_{\theta}(p) = K_{\theta} \cdot \frac{(T_{\theta}p + 1)}{(\varepsilon p + 1)} \quad (5.4.4)$$

kde ε je realizačná časová konštanta, nastavená $\varepsilon = 0,001$ s.

Celková schéma riadenia s regulátormi bude potom vyzeráť ako na Obr. 5.2.

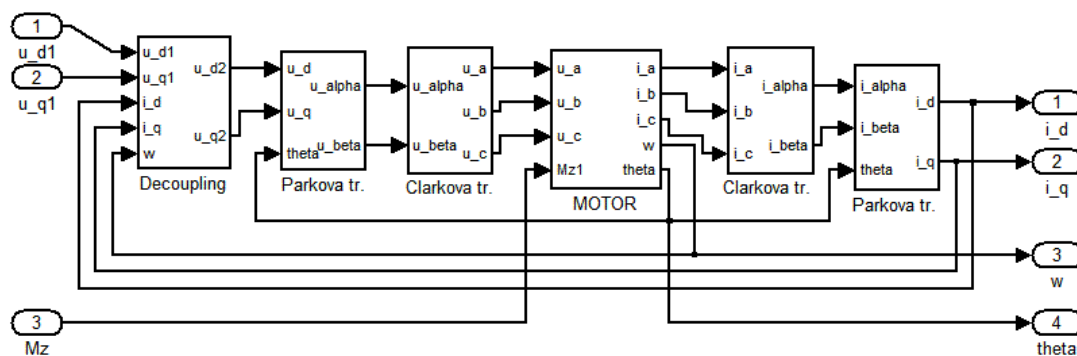


Obr. 5.2. Celková schéma řízení s regulátory.

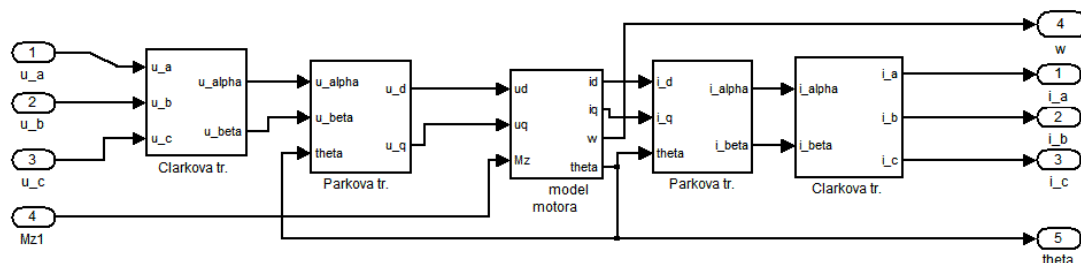
Regulační zásahy regulátorů proudu směřují do bloku decouplingu, který pracuje podle kapitoly 4.4.

Aby sme boli schopní merať prúdy fáz i_a , i_b , i_c a napätia u_a , u_b , u_c , zaviedli sme sústavu blokov priamych a spätných Parkových a Clarkových transformácií, ktoré transformujú fázové veličiny a,b,c na veličiny v súradnicovej sústave d,q.

Blok „M s transformáciami“ je znázornený na Obr. 5.3. Blok „MOTOR“ je na Obr. 5.4. Vo vnútornom bloku „model motora“ sa nachádza Obr. 5.1.



Obr. 5.3. Blok M s tranformáciami.



Obr. 5.4. Blok Motor.

5.4.2 Kritériá kvality regulácie

Na posúdenie kvality regulácie som použila kritériá kvality regulácie, ktoré zohľadňujú dynamické vlastnosti obvodu, napr. rýchlosť odoznenia, maximálny prechyt a kmitavosť prechodného deja.

Modifikované kritérium usmernenej lineárnej plochy sa na rozdiel od lineárneho integrálneho kritéria dá použiť aj na skúmanie kmitavých dejov. Nevýhodou je výpočet absolútnej hodnoty. Definuje sa ako

$$J_{UL} = \int_0^{\infty} |e(t) - e(\infty)| dt \quad (5.4.5)$$

kde $e(t)$ je regulačná odchýlka v čase t a $e(\infty)$ je ustálená regulačná odchýlka.

Kvadratické integrálne kritérium favorizuje rýchlu elimináciu odchýlky aj za cenu jej väčšej kmitavosti. Platí preň

$$J_K = \int_0^{\infty} [e(t) - e(\infty)]^2 dt \quad (5.4.6)$$

Kritérium ITAE (Integral of Time multiplied by Absolute Value of Error) patrí medzi váhové kritériá, kde závažnosť odchýlky narastá lineárne s časom. Odstraňuje tak nevýhodu kvadratického kritéria (vysoký prechyt).

$$J_{ITAE} = \int_0^{\infty} |e(t) - e(\infty)| t dt \quad (5.4.7)$$

5.4.3 Konštanty pre regulátory

Konštanty pre regulátory boli navrhnuté s využitím kritérií kvality regulácie, zvážení vplyvu variability parametrov a ako aj s ohľadom na maximálny prechod prúdov.

Pre uvedený model boli prakticky prevedené výpočty regulačných plôch podľa kapitoly 5.4.2. s uvažovaním rôznych hodnôt zosilnení a časových konštánt.

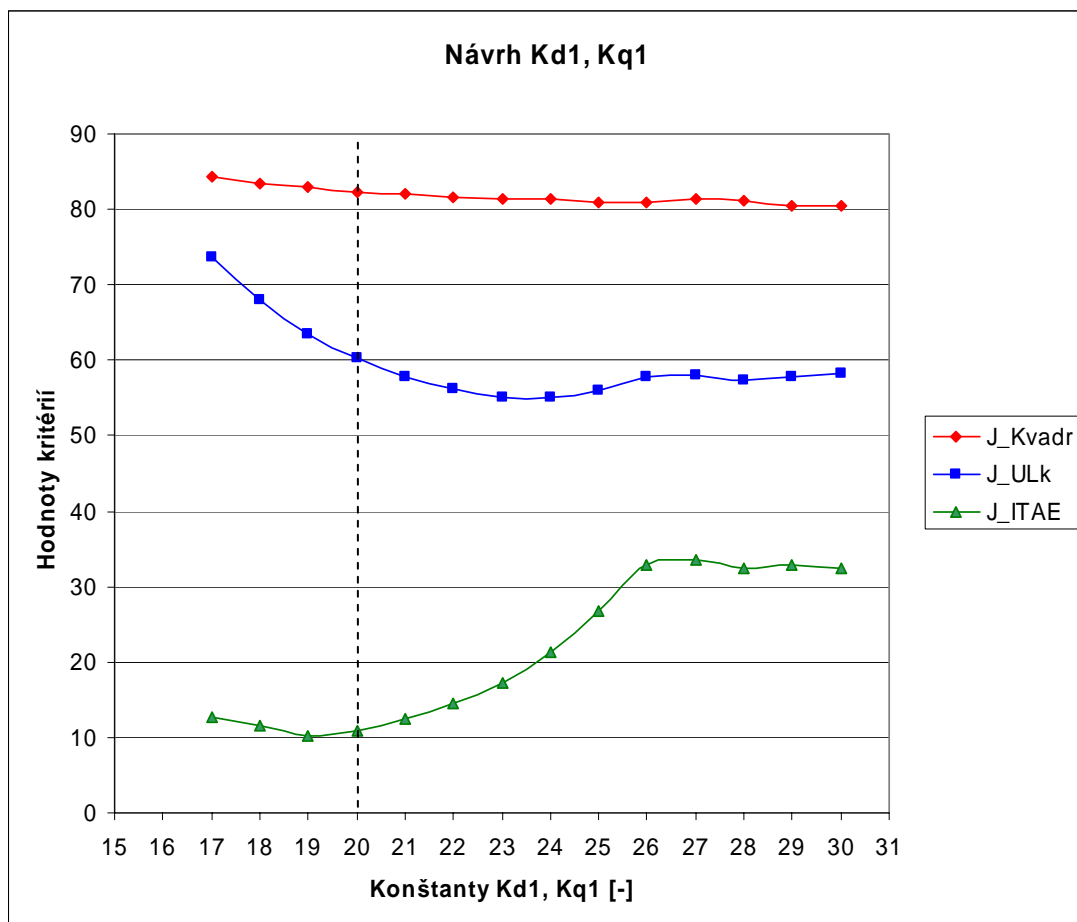
Z uvedenej celkovej schémy vyplýva, že potrebujeme nastaviť nasledujúce zosilnenia a časové konštanty regulátorov uvedené v tabuľke.

Na základe závislosti kvality regulácie na hodnotách zosilnení a konštánt regulátorov boli vybrané nasledujúce hodnoty. Tabuľka zohľadňuje aj kontrolu na maximálne prechody prúdu.

Regulátor	Konštant	Hodnota
R_{id}	K_{d1} [-]	20
R_{iq}	K_{q1} [-]	20
R_{ω}	K_{ω} [-]	4
	T_1 [s]	0,110
	T_2 [s]	0,020
	ε [s]	0,001
R_{θ}	K_{θ} [-]	3
	T_{θ} [s]	0,002
	ε [s]	0,001

Tab. 5.3. Nastavenie regulátorov.

Príklad závislosti kritériálnych hodnôt od zosilňovacích konštánt :



Obr. 5.5. Návrh zesilňovacích konstant proudových regulátorov.

6. VPLYV ZMIEN PARAMETROV MOTORA NA REGULÁCIU

Väčšina parametrov motora zvolených podľa kapitoly 5.3 ostáva v prevádzke konštantná (L_d , L_q , p_p , K_E).

Zahrievaním súčastí motora sa mení odpor R jeho vinutí. Tiež je možné meniť hmotnosť pasívnej záťaže m_z v určených medziach.

6.1 TEPLOTNÉ ZMENY ODPORU VINUTÍ R

Odpor vinutí pri teplote 25 °C je $R_{25^\circ\text{C}} = 6,8 \, \Omega$. Maximálna teplota vinutia je 125 °C. Rozsah teplôt, pri ktorých motor pracuje, je teda viac ako 100 °C. V tomto teplotnom rozsahu odpor R zvyšuje svoju hodnotu až o 39 %, ako vidno z priloženej tabuľky.

Odpor medi, z ktorej je zhotovené vinutie, sa mení s rastúcou teplotou podľa vzťahu

$$R = R_{ref} \cdot [\alpha_{Cu} \cdot (T - T_{ref}) + 1] \quad (6.1.1)$$

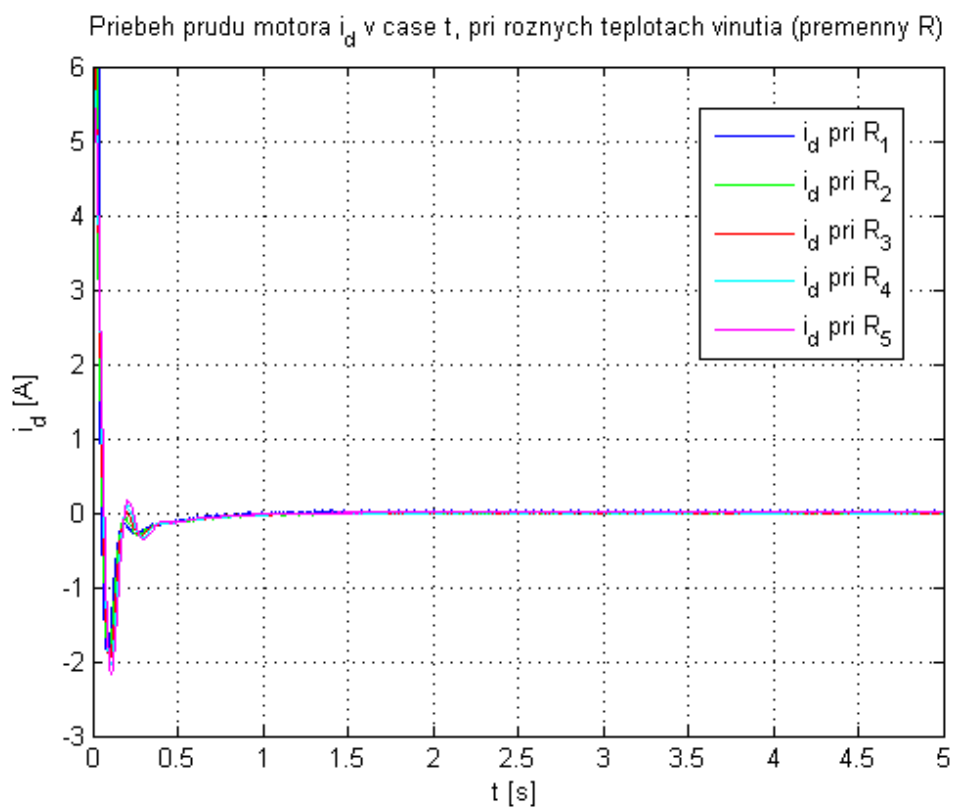
kde R je odpor pri danej teplote T , R_{ref} je odpor pri referenčnej teplote T_{ref} , α_{Cu} je teplotný koeficient rezistivity elektrotechnickej medi, rovný $\alpha_{Cu} = 3,900 \cdot 10^{-3} \, \text{K}^{-1}$. [12]

Na skúmanie závislosti som vybrala päť teplôt v rozsahu 25 °C až 125 °C. Podľa vyššie uvedeného vzťahu som získala príslušné teploty vinutia a otestovala odolnosť regulácie.

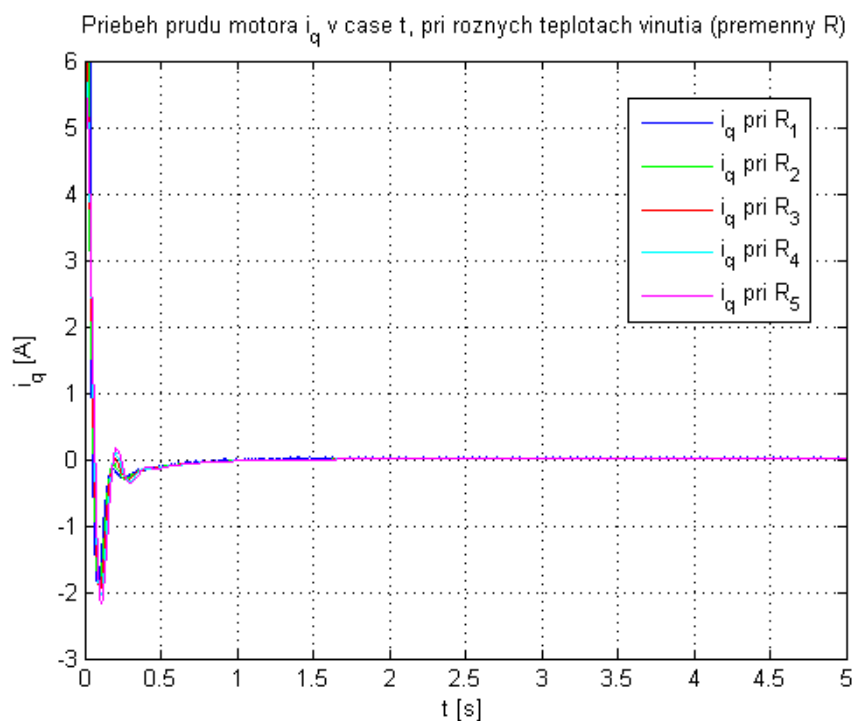
Pri skúmaní vplyvu zmien odporu R bolo žiadané posunutie nastavené na $d = 0,720 \, \text{m}$ a hmotnosť záťaže $m_z = 58,8580 \, \text{kg}$.

t [°C]	R_t [Ω]	Značení v grafoch
25	6,8000	R_1
50	7,4630	R_2
75	8,1260	R_3
100	8,7890	R_4
125	9,4520	R_5

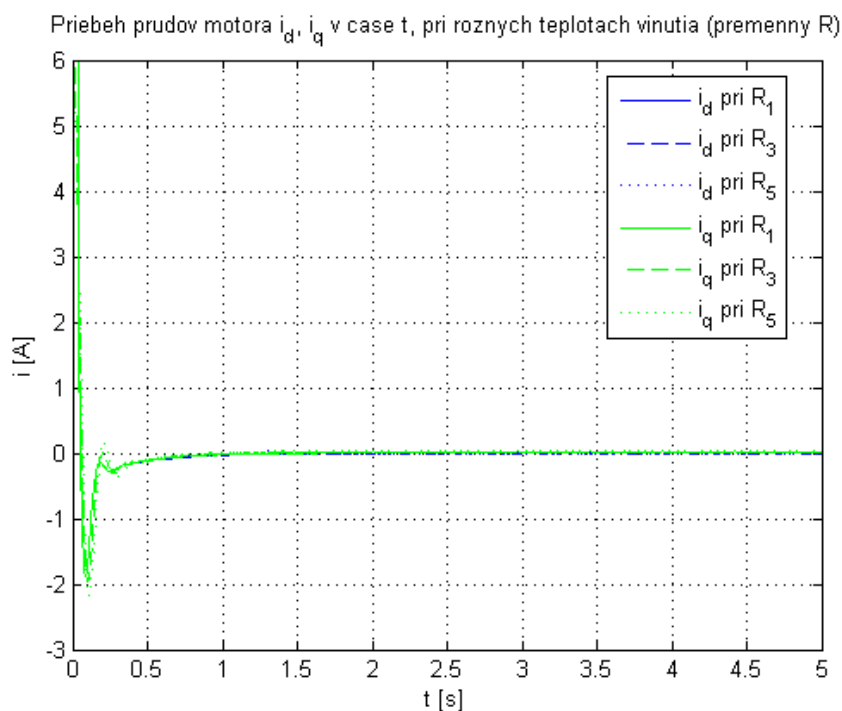
Tab. 6.1. Zvolené teploty a príslušné odpory.



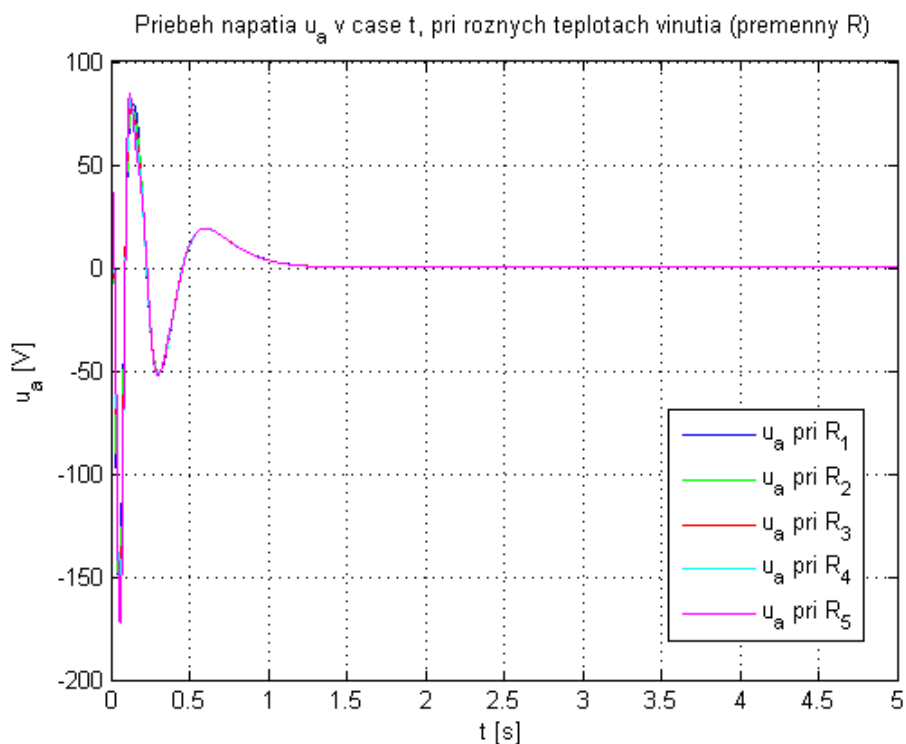
Obr. 6.1. Priebeh prúdu i_d pri rôznych teplotách vinutia.



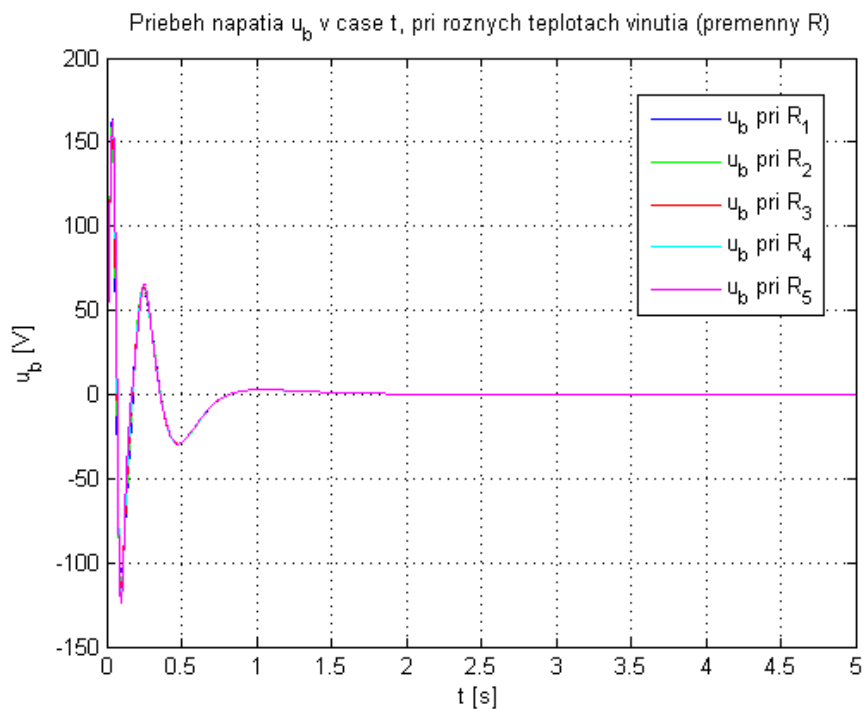
Obr. 6.2. Priebeh prúdu i_q pri rôznych teplotách vinutia.



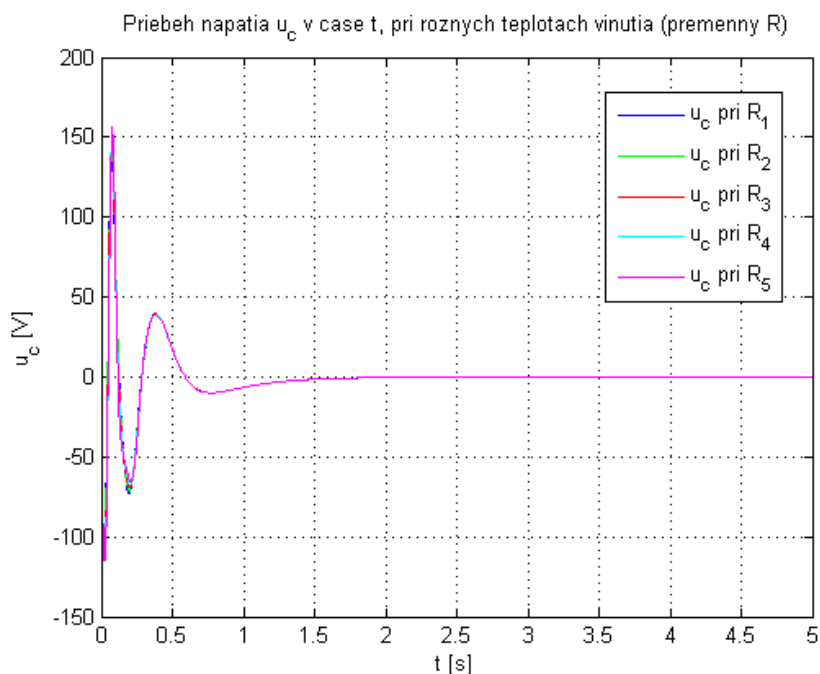
Obr. 6.3. Priebeh prúdov i_d, i_q pri rôznych teplotách vinutia



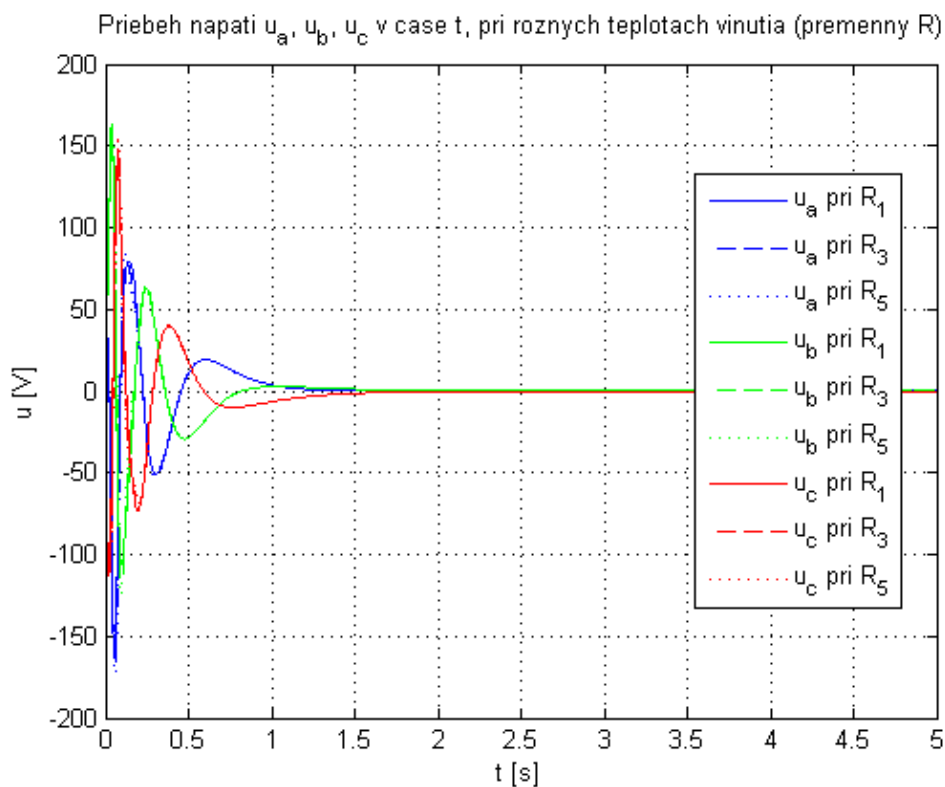
Obr. 6.4. Priebeh napätia u_a pri rôznych teplotách vinutia.



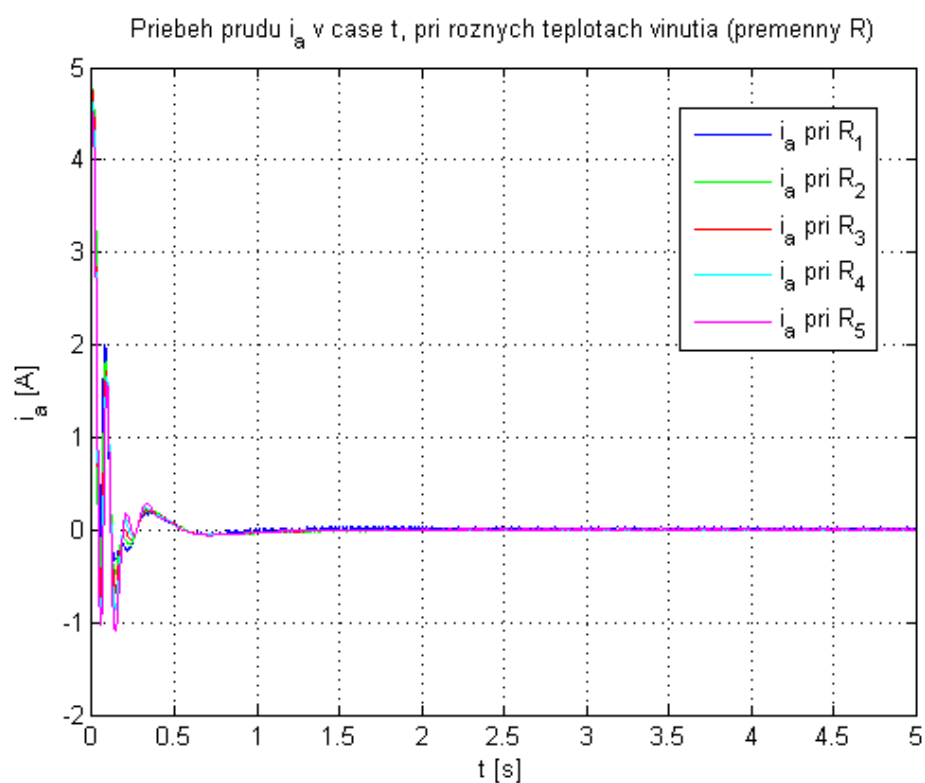
Obr. 6.5. Priebeh napätia u_b pri rôznych teplotách vinutia.



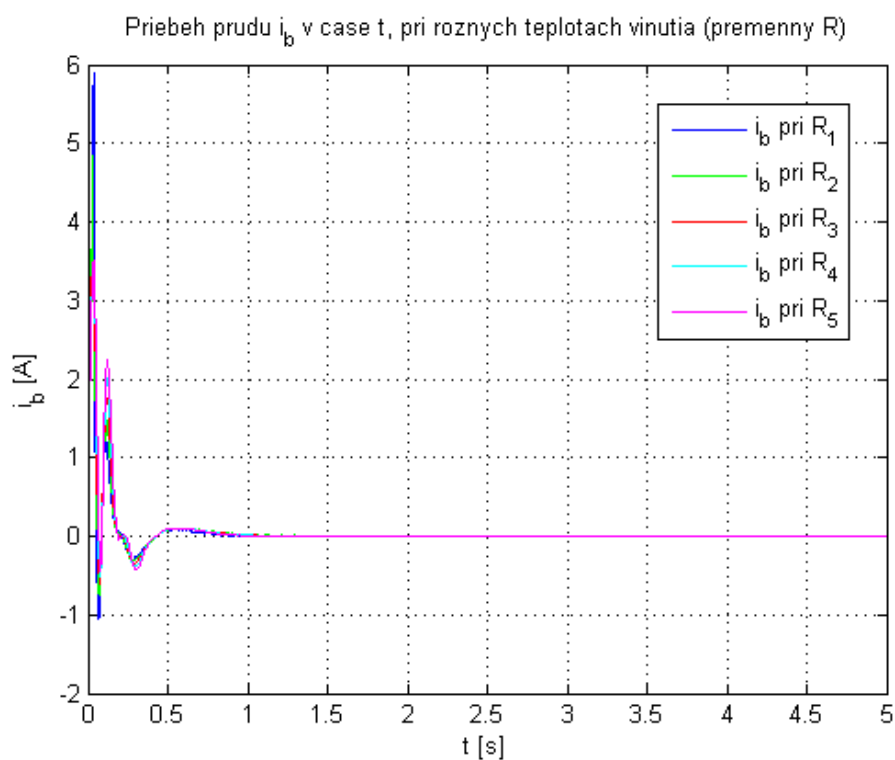
Obr. 6.6. Priebeh napätia u_c pri rôznych teplotách vinutia.



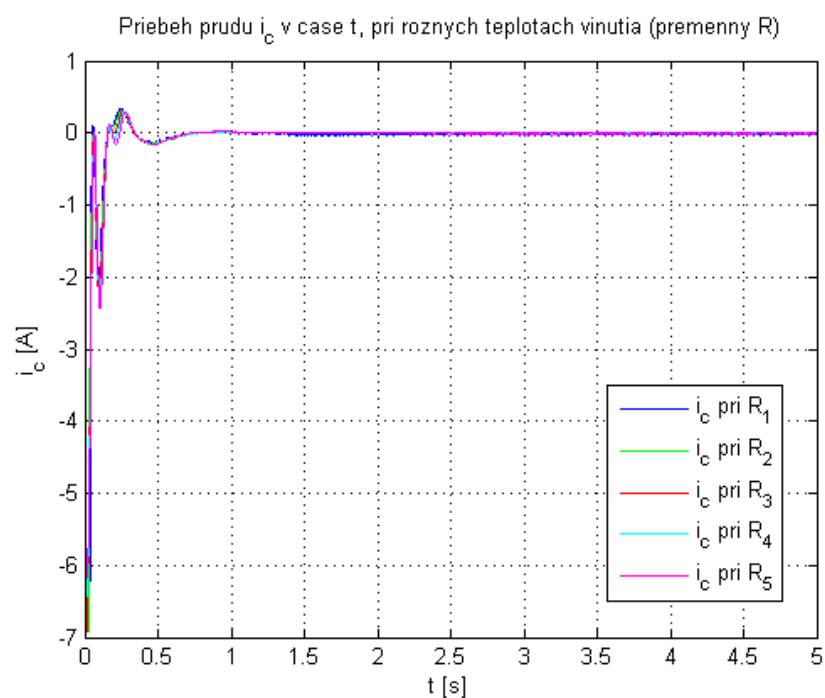
Obr. 6.7. Priebeh napätí u_a , u_b , u_c pri rôznych teplotách vinutia.



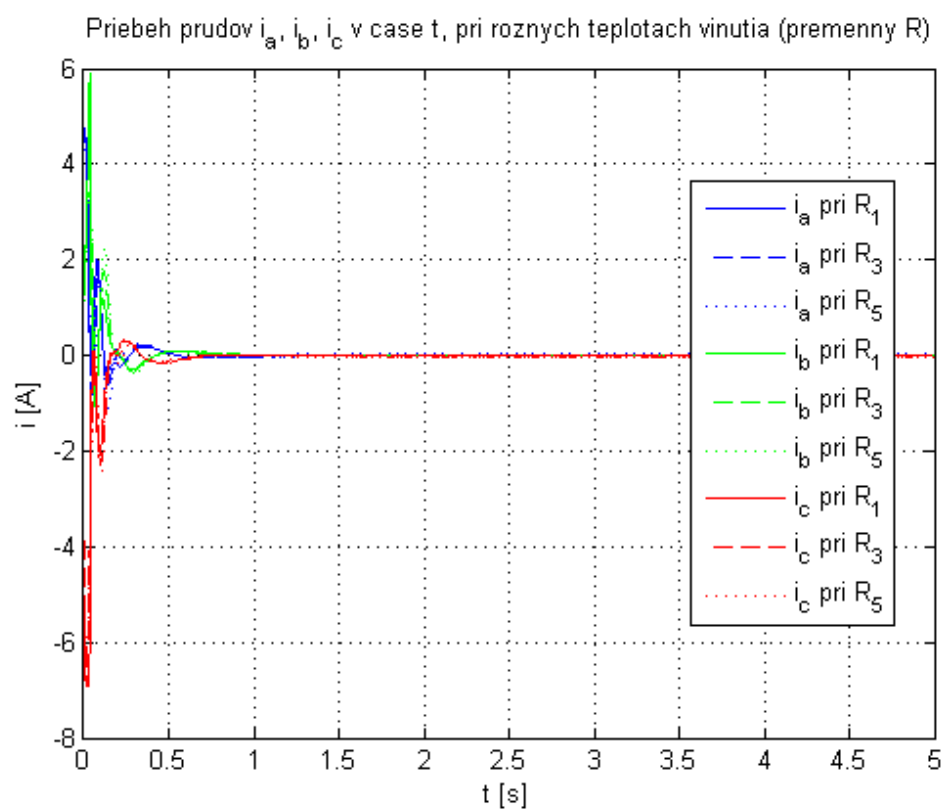
Obr. 6.8. Priebeh prúdu i_a pri rôznych teplotách vinutia.



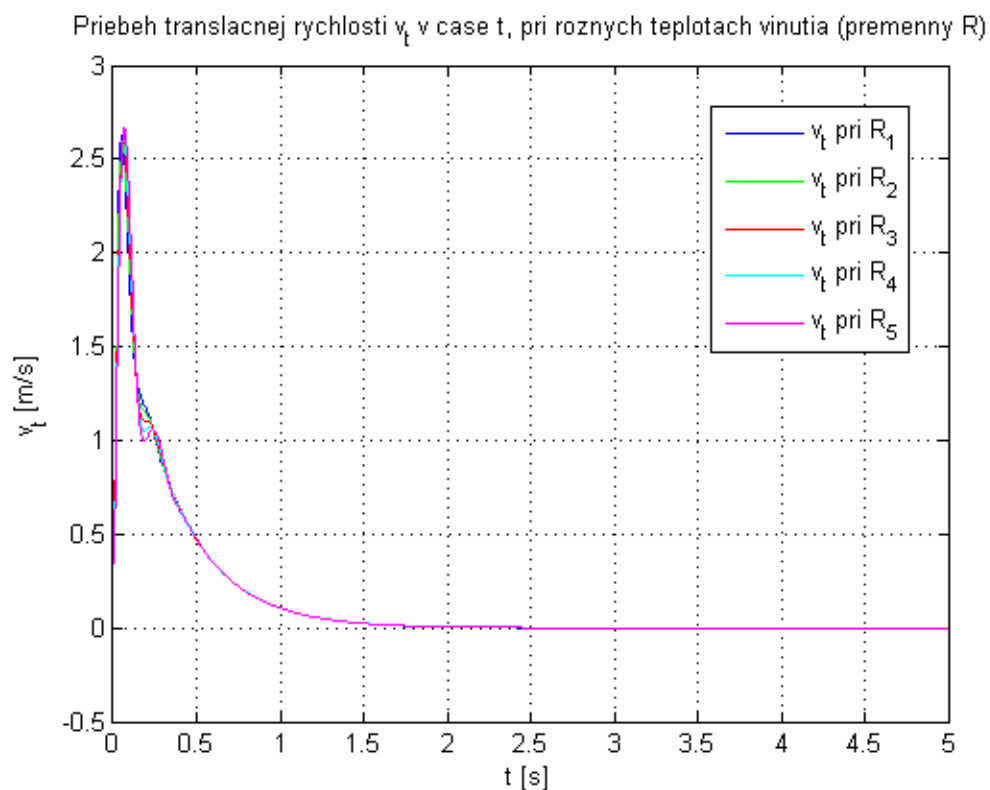
Obr. 6.9. Priebeh prúdu i_b pri rôznych teplotách vinutia



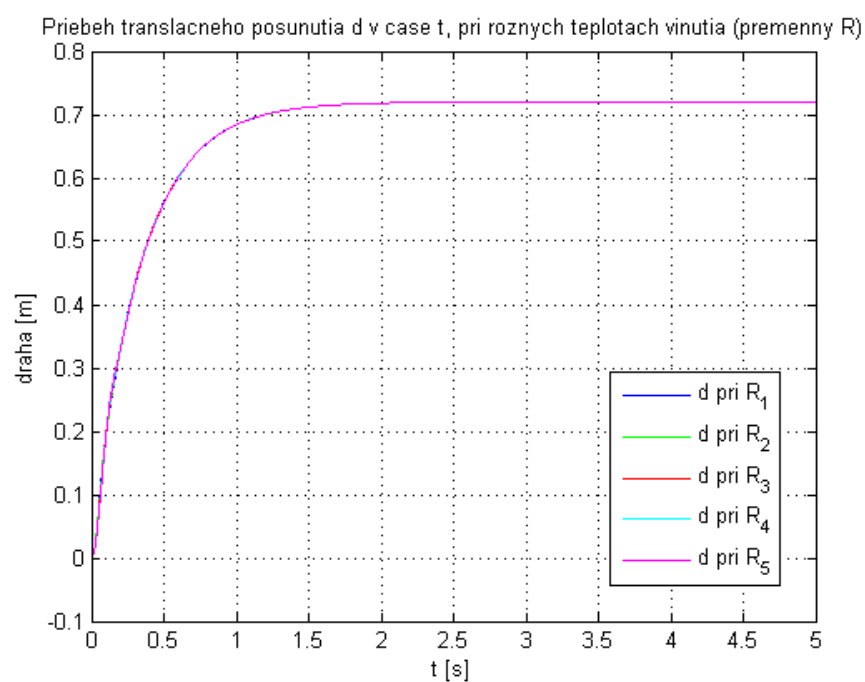
Obr. 6.10. Priebeh prúdu i_c pri rôznych teplotách vinutia



Obr. 6.11. Priebeh prúdov i_a , i_b , i_c pri rôznych teplotách vinutia



Obr. 6.12. Priebeh translačnej rýchlosti v_t pri rôznych teplotách vinutia.



Obr. 6.13. Priebeh translačného posunutia d pri rôznych teplotách vinutia.

Významným parametrom hodnotenia kvality regulácie je čas ustálenia (settling time). Časom ustálenia rozumieme dobu, za ktorú odozva systému na jednotkový skok vojde do pásma 95-105 % žiadanej hodnoty, a už z nej nevyjde (error band; alternatívne sa môže použiť $\pm 10\%$ konečnej hodnoty). [14]

	Settling time [s]		
Odpor	v_t	θ	d
R1	1,25931	1,00671	1,00671
R2	1,25935	1,00398	0,92098
R3	1,26137	1,00497	1,00497
R4	1,26096	1,00562	1,00562
R5	1,26008	1,00464	1,00464

Tab.6.2. Časy ustálenia pre sledované hodnoty.

Rešpektovanie zmien hodnoty R ukázalo na nevhodné kmitanie hodnôt prúdov i_d , i_q , na základe čoho som opravila konštanty regulátora, čo je už zohľadnené v tabuľke v kapitole 5.4.3.

Po tejto zmene sa nastavená regulácia dokáže dobre vyrovnáť s teplotnými zmenami odporu.

6.2 ZMENY HMOTNOSTI ZÁŤAŽE

Menovitá sila, ktorú je schopný motor trvalo vyvíjať, je $F = 577,2$ N. Z toho vyplýva maximálna hmotnosť záťaže

$$m_{z,\max} = \frac{F}{g} = \frac{577,2\text{N}}{9,80665\text{m/s}^2} = 58,8580 \text{ kg}$$

Na skúmanie závislosti som vybrala päť rôznych hmotností záťaže. V tomto prípade sa však s hmotnosťou záťaže m_z menia aj ďalšie veličiny, celková hmotnosť m_c , moment zotrvačnosti J a záťažný moment M_z .

$$m_c = m_m + m_z \quad (5.2.5)$$

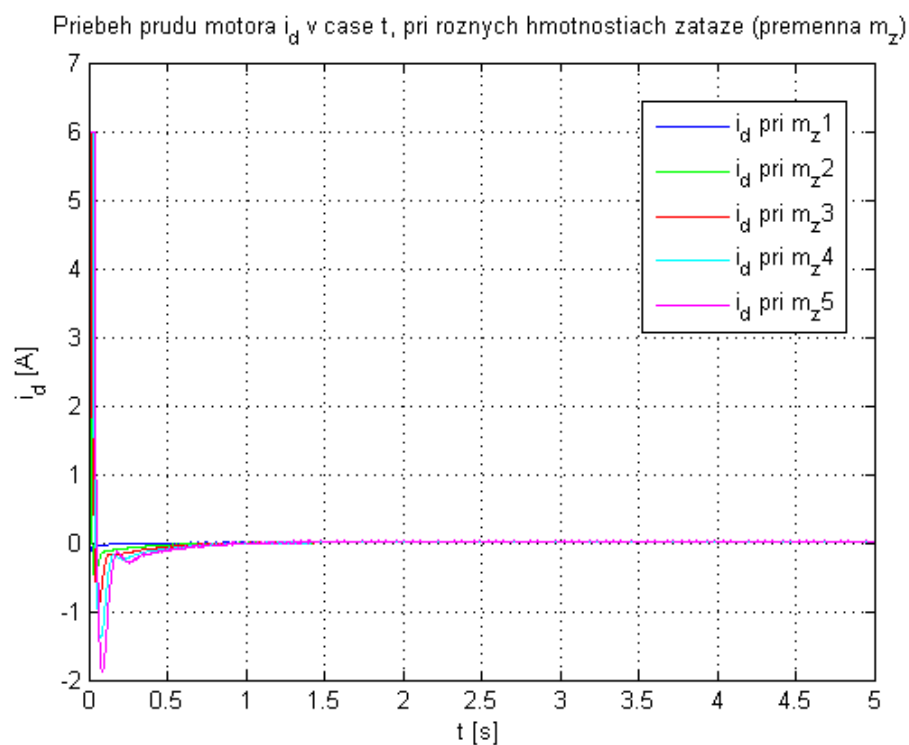
$$J = m_c \cdot r^2 \quad (5.2.6)$$

$$M = m_z \cdot g \cdot r \quad (5.2.7)$$

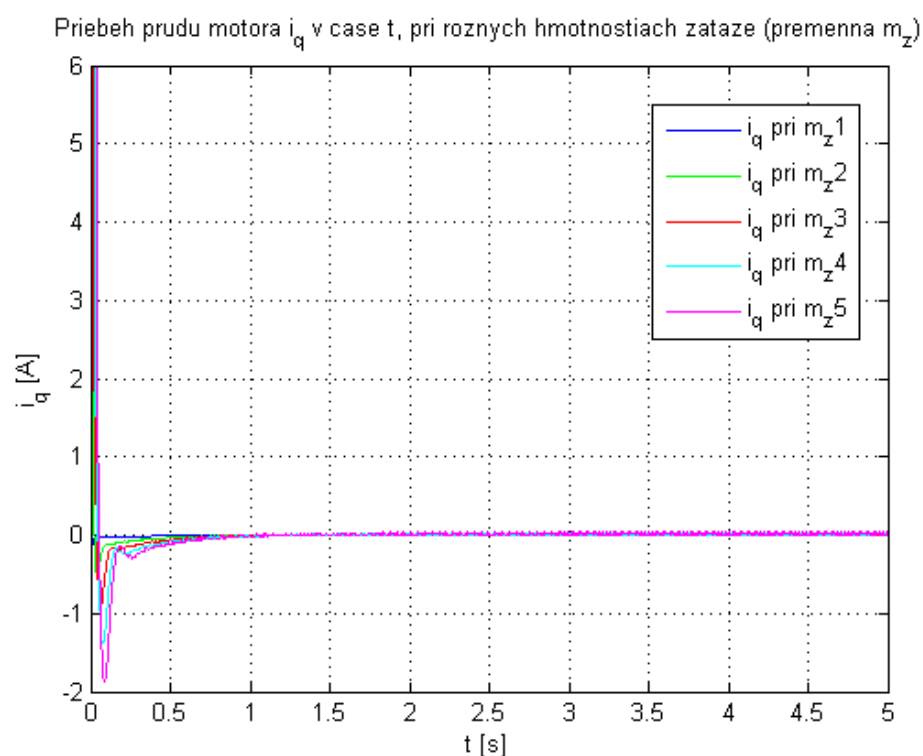
Pri skúmaní vplyvu zmien hmotnosti záťaže m_z bolo žiadané posunutie nastavené na $d = 0,720$ m a odpor na $R = 6,8 \Omega$.

m_z [kg]	M_z [N.m]	J_{rot} [kg.m ²]	Značenie v grafoch
1,0000	0,5619	0,0144	m_{z1}
15,0000	8,4282	0,0604	m_{z2}
30,0000	16,8564	0,1096	m_{z3}
45,0000	25,2846	0,1589	m_{z4}
58,8580	33,0711	0,2044	m_{z5}

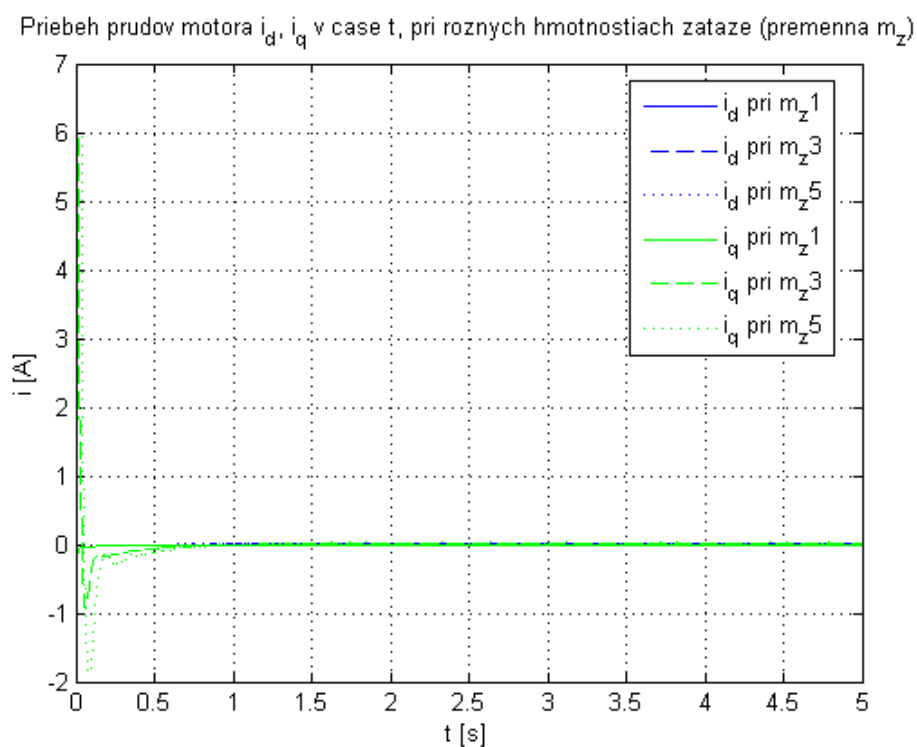
Tab. 6.3. Zvolené hmotnosti záťaže a príslušné momenty.



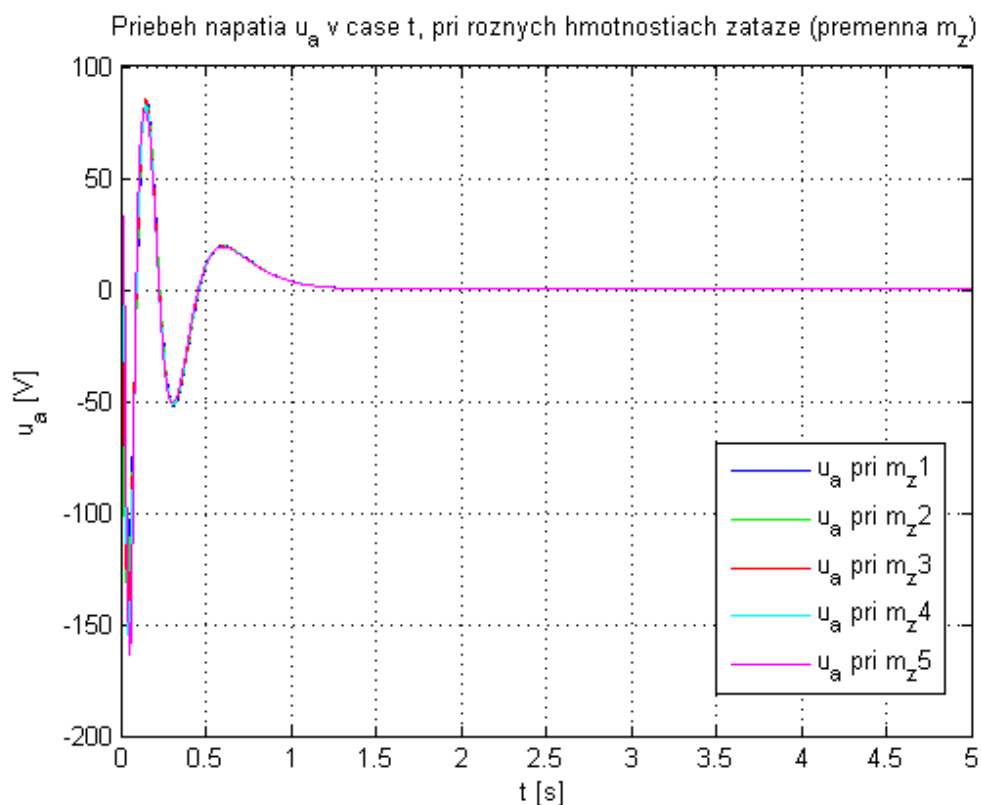
Obr. 6.14. Priebeh prúdu i_d pri rôznych hmotnostiach záťaže.



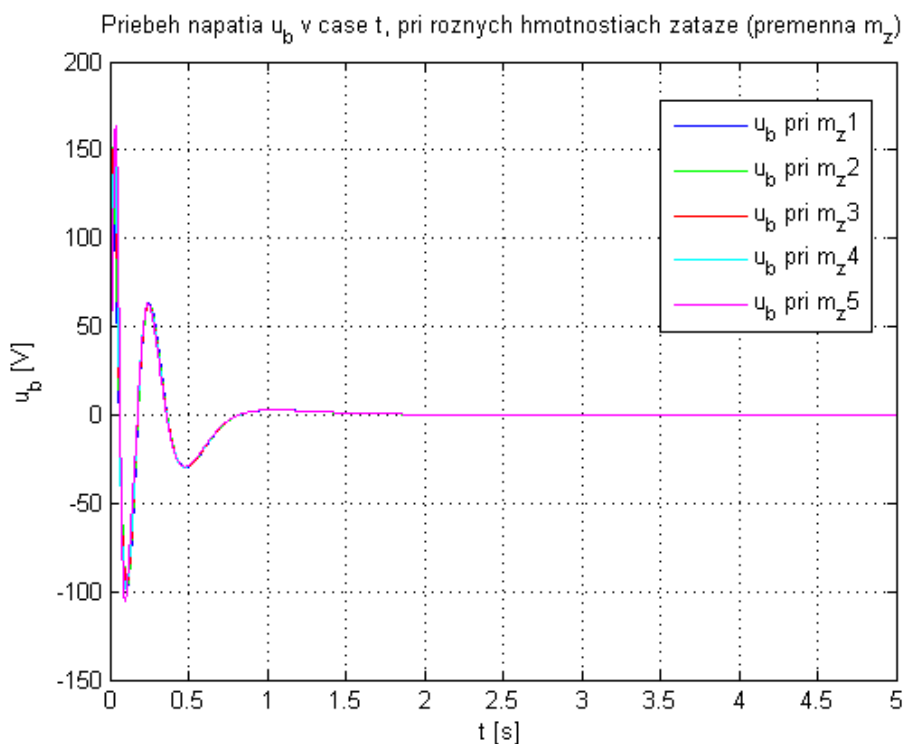
Obr. 6.15. Priebeh prúdu i_q pri rôznych hmotnostiach záťaže.



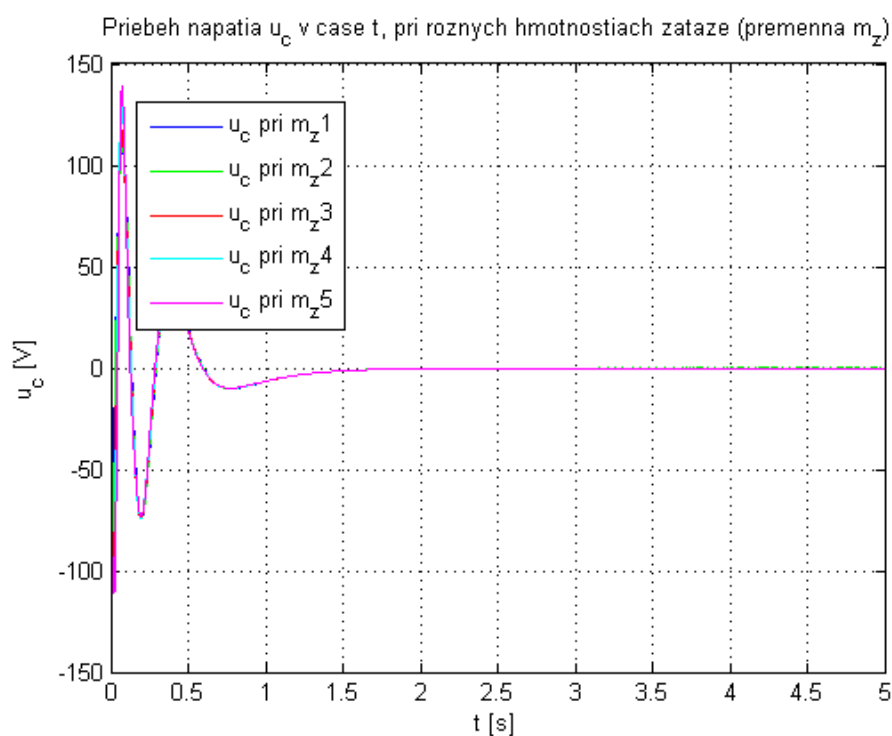
Obr. 6.16. Priebeh prúdov i_d , i_q pri rôznych hmotnostiach záťaže.



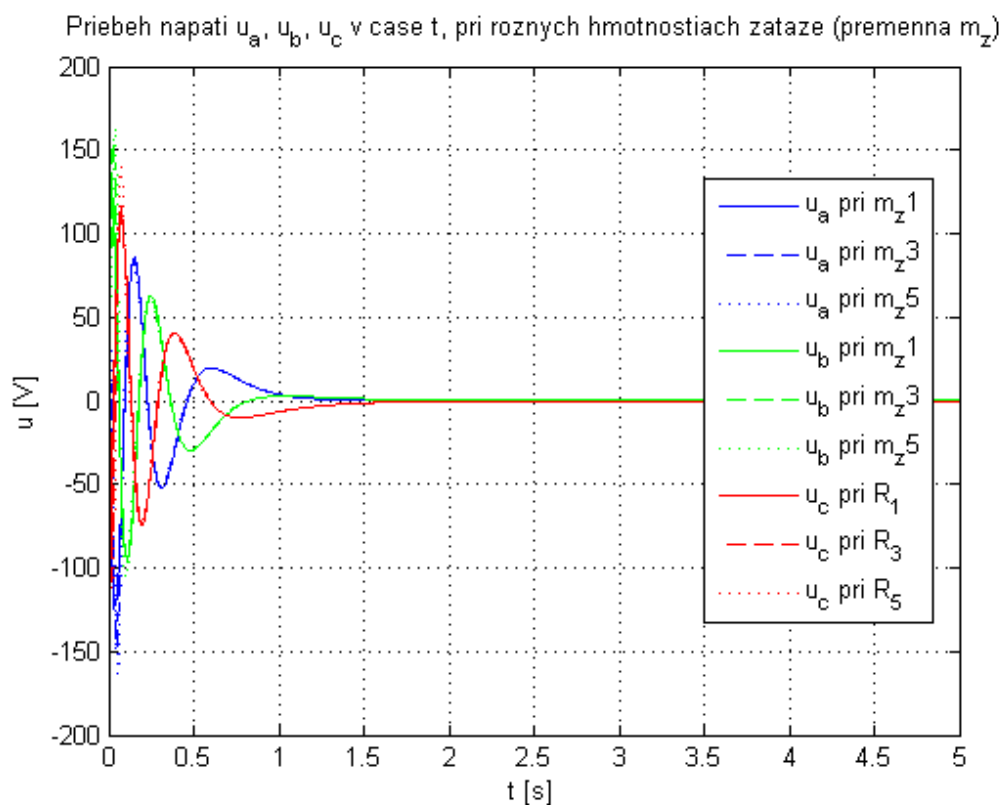
Obr. 6.17. Priebeh napätia u_a pri rôznych hmotnostiach záťaže.



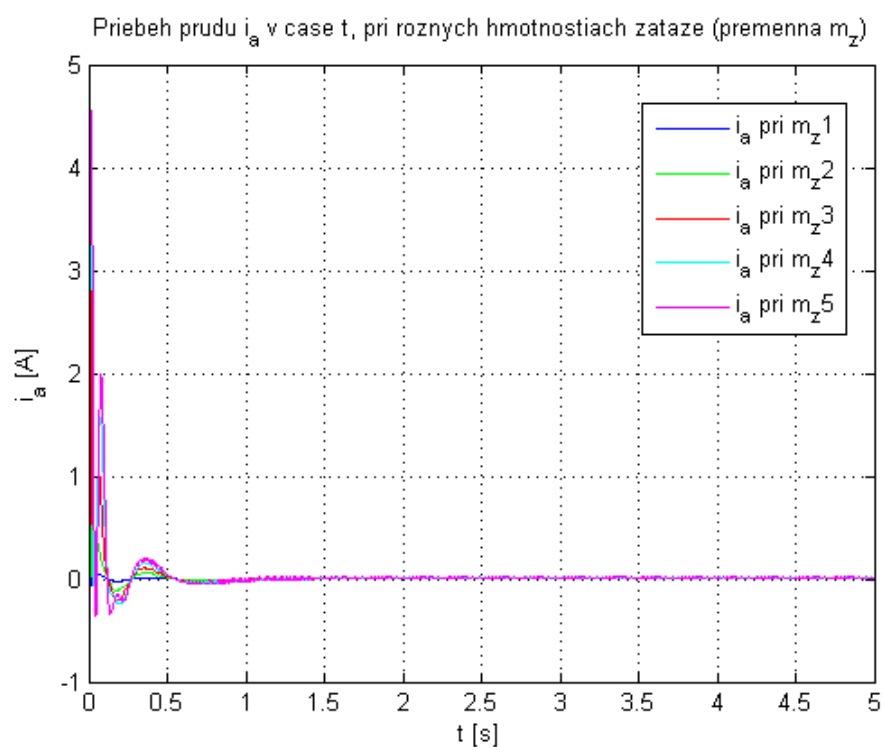
Obr. 6.18. Priebeh napätia u_b pri rôznych hmotnostiach záťaže.



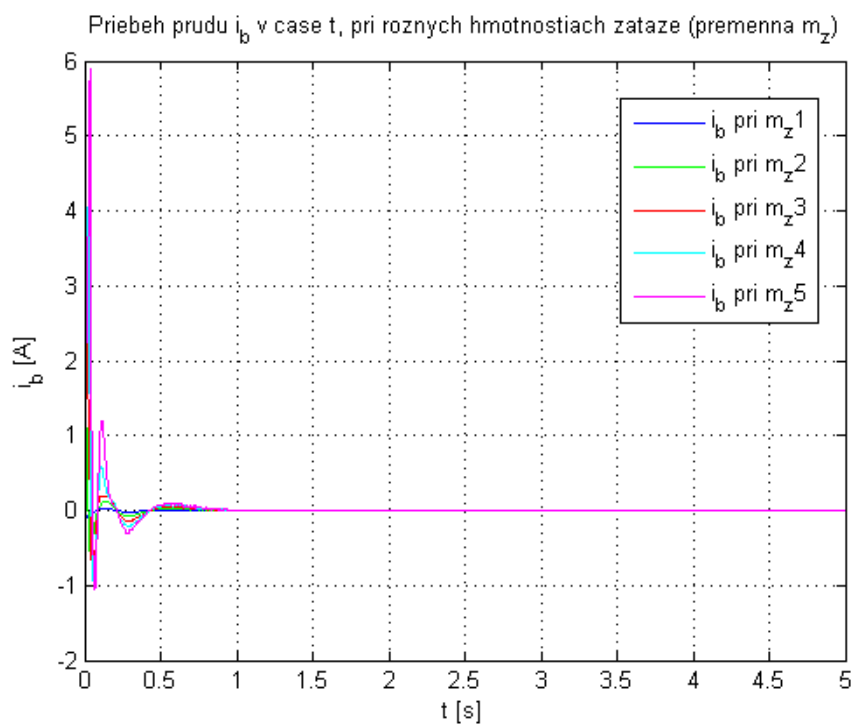
Obr. 6.19. Priebeh napätia u_c pri rôznych hmotnostiach zát'aže.



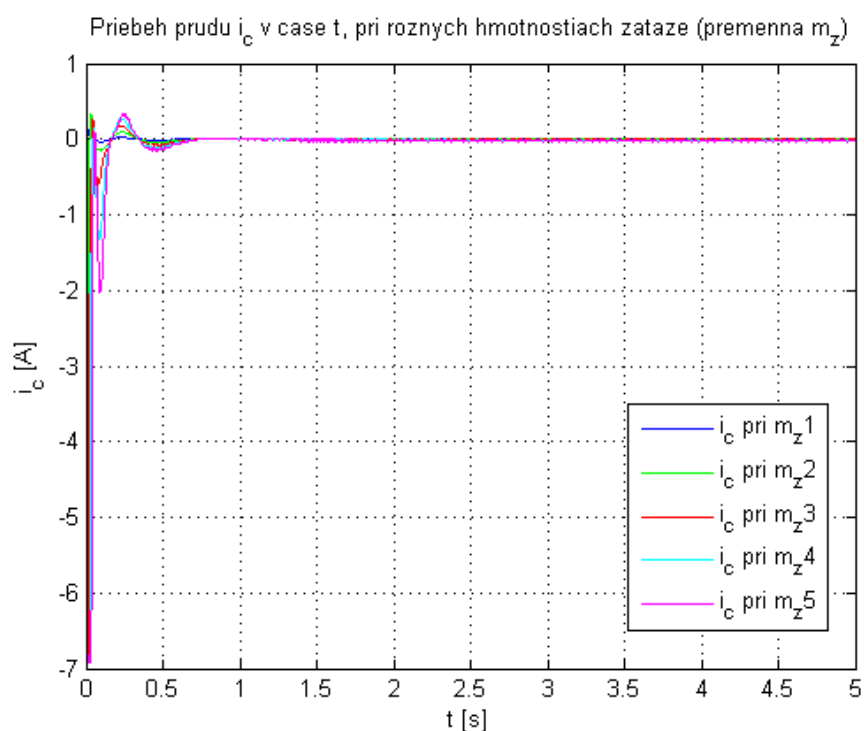
Obr. 6.20. Priebeh napätí u_a , u_b , u_c pri rôznych hmotnostiach zát'aže.



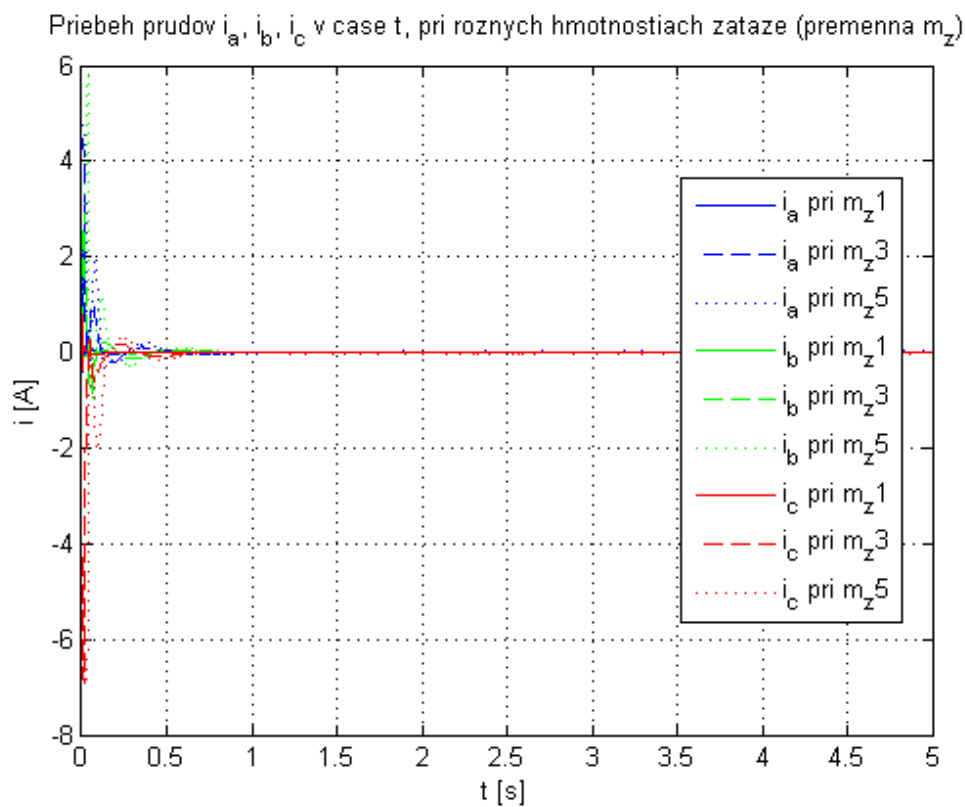
Obr. 6.21. Priebeh prúdu i_a pri rôznych hmotnostiach záťaže.



Obr. 6.22. Priebeh prúdu i_b pri rôznych hmotnostiach záťaže.

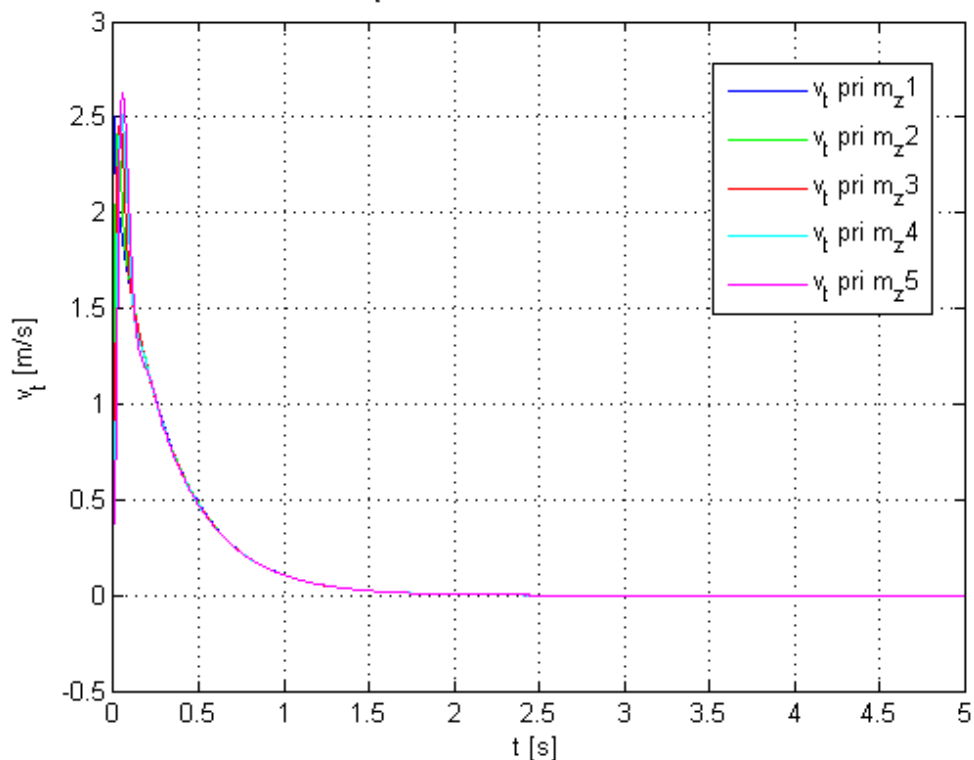


Obr. 6.23. Priebeh prúdu i_c pri rôznych hmotnostiach záťaže.



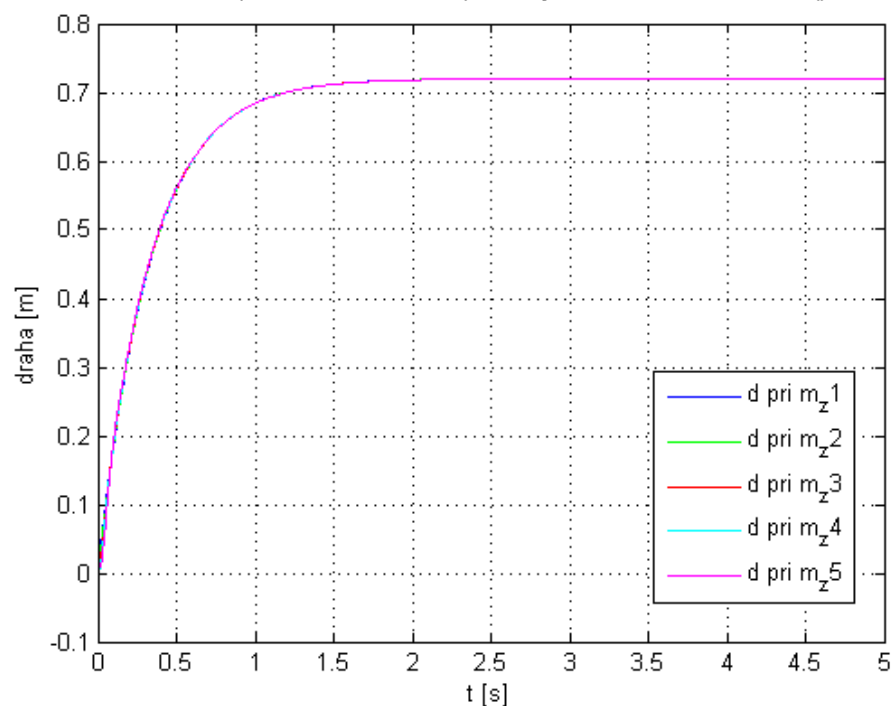
Obr. 6.24. Priebeh prúdov i_a , i_b , i_c pri rôznych hmotnostiach záťaže.

Priebeh translacnej rychlosti v_t v case t , pri roznych hmotnostiach zataze (premenna m_z)



Obr. 6.25. Priebeh translacnej rýchlosti v_t pri rôznych hmotnostiach záťaže.

Priebeh translacneho posunutia d v case t , pri roznych hmotnostiach zataze (premenna m_z)



Obr. 6.26. Priebeh translacného posunutia d pri rôznych hmotnostiach záťaže.

Zátěž	Settling time [s]		
	v_t	θ	d
mz1	1,25868	1,00159	1,00159
mz2	1,25811	1,00370	1,00370
mz3	1,25793	1,00401	1,00401
mz4	1,25966	1,00573	1,00573
mz5	1,25931	1,00671	1,00671

Tab.6.4. Časy ustálenia pre sledované hodnoty.

Z vyššie uvedených obrázkov je vidno, že nastavená regulácia uspokojivo pracuje s rozličnými hmotnosťami záťaže.

7. ZÁVER

Predložená práca sa zaoberá všeobecným princípom fungovania elektrických pohonov a konštrukciou synchronného elektrického motora.

Ďalej sa práca venuje porovnaniu lineárneho motora s rotačným motorom s prevodovkou a konštrukcii lineárneho motora. Bližšie sú opísané bežné typy lineárnych pohonov na trhu.

V nasledujúcom sa diskutuje popis veličín synchronného rotačného motora pomocou komplexorov, Clarkovej a Parkovej lineárnej transformácii rovníc. Je vysvetlený princíp vektorovo orientovaného riadenia elektrického pohonu.

Ďalej je ukázaný spôsob prevodu parametrov konkrétneho lineárneho motora na rotačné ekvivalenty, ktoré slúžia ako vstupy pre model. K modelu je navrhnutá bloková schéma riadenia na žiadané translačné posunutie a vyhodnotená kvalita regulácie.

Na záver je predložená simulácia priebehov skúmaných veličín pri zmene parametrov lineárneho motora, ktoré nastávajú v prevádzke.

Navrhnutý spôsob riadenia lineárneho motora ukazuje prijateľnú odolnosť voči zmenám parametrov.

8. ZOZNAM LITERATÚRY

- [1] Caha Z., Černý M.: *Elektrické pohony*. Ediční středisko ČVUT, 1987. Štandardné číslo neuvedené.
- [2] Poliak F., Fedák V., Zboray L.: *Elektrické pohony*. Alfa – vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry Bratislava, 1987. MDT 621.313.078.
- [3] Mazák Š. a kol.: *Elektrotechnický slovník náučný*. 6. zväzok. Alfa – vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry Bratislava, 1981.
- [4] Roubíček O.: *Elektrické motory a pohony: příručka techniky, volby a užití vybraných druhů*. Ben – technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-092-X.
- [5] *Linear Motors Application Guide*. Aerotech, rok vydania neuvedený.
- [6] Gieras J. F., Piech Z.: *Linear Synchronous Motors: Transportation and Automation Systems*. CRC Press, 1999. Štandardné číslo neuvedené.
- [7] Bose B. K.: *Modern Power Electronics and AC Drives*. Prentice Hall PTR, 2002. ISBN 0-13-016743-6.
- [8] *Elektronická učebnica silnoprúdových zariadení* [online]. Verzia neuvedená. [Cit. 2008-11-12]. URL: www.spslevice.sk/soc-uceb-siz2007/Elektronicka%20ucebnica%20SIZ/AD%20Uvodna%20stranka/SIZtem.html >.
- [9] *Shinagawa Tokyo* [online]. Verzia neuvedená. [Cit. 2009-01-03]. URL: www.industry.city.shinagawa.tokyo.jp.
- [10] Švarc I., Šeda M., Vítěčková M.: *Automatické řízení*. Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 80-2143-491-2.
- [11] Žalman M., Jovankovič J.: *Nové trendy v riadení lineárnych pohonov*. AT&P journal, 2/2006.
- [12] Griffiths D.: *7. Electrodynamics*. Prentice Hall, 1999. ISBN 0-13-805326-x
- [13] Blaha P., Vavřín P.: *Řízení a regulace I. Základy regulace lineárních systémů – spojité a diskrétní*. Skriptum FEKT VUT v Brně, 2005.
- [14] *System Dynamics – Response Time*. [online]. Verzia neuvedená. [Cit. 2009-05-12]. URL: www.facstaff.bucknell.edu/mastascu/eControlHTML/SysDyn/SysDyn5.html#Meas

ures>.

9. ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 2.1.	Principiálna schéma synchronného motoru (rotačného) s hladkým rotorom.	11
Obr. 3.1.	Lineárny motor, znázornenie statoru a jazdca.	13
Obr. 3.2.	U Channel linear motor, rotor.	15
Obr. 3.3.	Flat type linear motor.	16
Obr. 3.4.	Slotted iron flat motor.	17
Obr. 3.5.	Lineárny synchronný motor s permanentnými magnetmi a priečnym magnetickým tokom.	18
Obr. 4.1.	Schéma fyzikálneho modelu motora podľa stavových rovníc.	26
Obr. 4.2.	Všeobecná schéma decouplingu.	27
Obr. 4.3.	Vektorové riadenie.	29
Obr. 5.1.	Model motora so zavedenými obmedzeniami prúdov i_d , i_q a koeficientom trenia.	33
Obr. 5.2.	Celková schéma riadenia s regulátormi.	35
Obr. 5.3.	Blok M s transformáciami.	35
Obr. 5.4.	Blok Motor.	36
Obr. 5.5.	Návrh zosilňovacích konštánt prúdových regulátorov	38
Obr. 6.1.	Priebeh prúdu i_d pri rôznych teplotách vinutia.	40
Obr. 6.2.	Priebeh prúdu i_q pri rôznych teplotách vinutia.	41
Obr. 6.3.	Priebeh prúdov i_d , i_q pri rôznych teplotách vinutia	41
Obr. 6.4.	Priebeh napätia u_a pri rôznych teplotách vinutia.	42
Obr. 6.5.	Priebeh napätia u_b pri rôznych teplotách vinutia.	42
Obr. 6.6.	Priebeh napätia u_c pri rôznych teplotách vinutia.	43
Obr. 6.7.	Priebeh napätí u_a , u_b , u_c pri rôznych teplotách vinutia.	43
Obr. 6.8.	Priebeh prúdu i_a pri rôznych teplotách vinutia.	44
Obr. 6.9.	Priebeh prúdu i_b pri rôznych teplotách vinutia.	44
Obr. 6.10.	Priebeh prúdu i_c pri rôznych teplotách vinutia.	45
Obr. 6.11.	Priebeh prúdov i_a , i_b , i_c pri rôznych teplotách vinutia.	45

Obr. 6.12.	Priebeh translačnej rýchlosti v_t pri rôznych teplotách vinutia.	46
Obr. 6.13.	Priebeh translačného posunutia d pri rôznych teplotách vinutia.	46
Obr. 6.14.	Priebeh prúdu i_d pri rôznych hmotnostiach záťaže.	48
Obr. 6.15.	Priebeh prúdu i_q pri rôznych hmotnostiach záťaže.	49
Obr. 6.16.	Priebeh prúdov i_d, i_q pri rôznych hmotnostiach záťaže.	49
Obr. 6.17.	Priebeh napätia u_a pri rôznych hmotnostiach záťaže.	50
Obr. 6.18.	Priebeh napätia u_b pri rôznych hmotnostiach záťaže.	50
Obr. 6.19.	Priebeh napätia u_c pri rôznych hmotnostiach záťaže.	51
Obr. 6.20.	Priebeh napätí u_a, u_b, u_c pri rôznych hmotnostiach záťaže.	51
Obr. 6.21.	Priebeh prúdu i_a pri rôznych hmotnostiach záťaže.	52
Obr. 6.22.	Priebeh prúdu i_b pri rôznych hmotnostiach záťaže.	52
Obr. 6.23.	Priebeh prúdu i_c pri rôznych hmotnostiach záťaže.	53
Obr. 6.24.	Priebeh prúdov i_a, i_b, i_c pri rôznych hmotnostiach záťaže.	53
Obr. 6.25.	Priebeh translačnej rýchlosti v_t pri rôznych hmotnostiach záťaže.	54
Obr. 6.26.	Priebeh translačného posunutia d pri rôznych hmotnostiach záťaže.	54

10. ZOZNAM SKRATIEK A SYMBOLOV

Symbol	Význam
a, b, c	Fázy motora
B	Budiace vinutie
D, Q	Tlmiace vinutia
d	Translačné posunutie
d, q	Súradnicová sústava d, q toku ψ rotora
F	Sila
f	Frekvencia
i	Prúd
I_f	Prúd fáz
I_s	Prúd sieťových prívodov
J	Moment zotrvačnosti
K_E	Konštanta spätnej elektromotorickej sily
L	Elektrická dĺžka rotora
L_d, L_q	Zložky indukčnosti statora v d, q osiach
M	Moment sily
M_z	Zátťažný moment
m_c	Celková hmotnosť
m_m	Hmotnosť rotora
m_z	Hmotnosť záťaže
n	Otáčky
p_p	Počet pólových dvojíc
R	Odpor vinutí statora
T	Transformačná matica
u	Napätie
U_f, U_s	Napätie fáz, napätie sieťových prívodov
\hat{U}_{am}	Fázor napätia fázy a
\hat{u}_{am}	Komplexor napätia fázy a

U, V, W	Fázy
v_t	Posuvná rychlost'
Y, Δ	Spojenie do hviezdy, trojuholníka
α_{Cu}	Teplotný koeficient rezistivity medi
α, β	Súradnicový systém statora
ε	Realizačná časová konštanta (u regulátorov PI, PID)
η	Účinnosť
θ	Uhlové natočenie
	Uhol posunutia rotorových vinutí oproti statoru
κ	Uhol posunutia súradnicového systému K oproti statorovému systému
ω	Uhlová rýchlosť
ω_s	Synchrónna uhlová rýchlosť

11. ZOZNAM PRÍLOH

1. Zdrojový kód skriptov

12. PRÍLOHY

12.1 PRÍLOHA Č. 1 – ZDROJOVÝ KÓD

Program_R.m

```
close all; clear all; clc;
%% Parametre motora %%

% Premenne parametre
TC=[25 50 75 100 125]; % [C] Teplota vinutia - linearne
% TC=[25.0000 37.3837 55.9017 83.5925 125.0000]; % [C] Teplota
vinutia - logaritmicky
alpha=3.9e-3; % [1/K] Teplotny koeficient rezistivity eCu

R_vekt=6.8.*(alpha.*(TC-25)+1); % [Ohm] Odpor statora

% Nepremenne parametre
Ld=6*10^(-3); % [H] Indukcnost statora
Lq=6*10^(-3); % [H] Indukcnost rotora

Pp=6; % [-] Pocet polovych dvojic motora

Leng=0.360; % [m] Coil length - Elektricka dlzka rotora
r=Leng/(2*pi); % [m] polomer na prepocitavania z rotac. na
translac. pohyb

m_m=3.4; % [kg] Hmotnost jazdca
m_z=58.8580; % [kg] Hmotnost zataze
m_c=m_m+m_z; % [kg] Hmotnost (pohybl.sucasti motora + zataze)

g=9.80665; % [m/s^2] Gravitacne zrychlenie
Mz=m_z*g*r; % [N.m] Zatazny moment

KErot=(77.155*Leng)/(2*pi); % [V.s/rad] Konstanta elektromotorickej
sily, prepoc. na rotacnu
Jrot=m_c*r^2; % [kg.m^2] Moment zotrvcnosti rotora

% Pre (PI) R_id, R_iq
Kd1=20;
Kq1=20;

% Pre (PID) R_w
Kw=4.0;
T1=0.110;
T2=0.020;

% Pre (PD) R_theta
```

```
Kth=3.0;
Th=0.002;

% Realizacna cas. konstanta eps
eps=0.001;

d=0.720;          % [m] ziadany posun jazdca motora, 0.06 m je asi 1
rad
theta_ziad=d/r;

% Hodnoty Obmedzeni
Obm_id=6;
Obm_iq=6;

%% Vplyv variability parametrov
R=R_vekt(1);          % 1
sim('m_15',[0 5]);

t1=simout.time;
id1=simout.signals.values(:,1);
iq1=simout.signals.values(:,2);
omegal=simout.signals.values(:,3);
thetal=simout.signals.values(:,4);

ual=simout1.signals.values(:,1);
ub1=simout1.signals.values(:,2);
uc1=simout1.signals.values(:,3);
ud1=simout1.signals.values(:,4);
uq1=simout1.signals.values(:,5);

ial=simout2.signals.values(:,1);
ib1=simout2.signals.values(:,2);
icl=simout2.signals.values(:,3);

rychl1=r.*omegal;
draha1=r.*thetal;

R=R_vekt(2);          % 2
sim('m_15',[0 5]);

t2=simout.time;
id2=simout.signals.values(:,1);
iq2=simout.signals.values(:,2);
omega2=simout.signals.values(:,3);
theta2=simout.signals.values(:,4);

ua2=simout1.signals.values(:,1);
ub2=simout1.signals.values(:,2);
uc2=simout1.signals.values(:,3);
ud2=simout1.signals.values(:,4);
uq2=simout1.signals.values(:,5);

ia2=simout2.signals.values(:,1);
ib2=simout2.signals.values(:,2);
```

```
ic2=simout2.signals.values(:,3);

rychl2=r.*omega2;
draha2=r.*theta2;

R=R_vekt(3); % 3
sim('m_15',[0 5]);

t3=simout.time;
id3=simout.signals.values(:,1);
iq3=simout.signals.values(:,2);
omega3=simout.signals.values(:,3);
theta3=simout.signals.values(:,4);

ua3=simout1.signals.values(:,1);
ub3=simout1.signals.values(:,2);
uc3=simout1.signals.values(:,3);
ud3=simout1.signals.values(:,4);
uq3=simout1.signals.values(:,5);

ia3=simout2.signals.values(:,1);
ib3=simout2.signals.values(:,2);
ic3=simout2.signals.values(:,3);

rychl3=r.*omega3;
draha3=r.*theta3;

R=R_vekt(4); % 4
sim('m_15',[0 5]);

t4=simout.time;
id4=simout.signals.values(:,1);
iq4=simout.signals.values(:,2);
omega4=simout.signals.values(:,3);
theta4=simout.signals.values(:,4);

ua4=simout1.signals.values(:,1);
ub4=simout1.signals.values(:,2);
uc4=simout1.signals.values(:,3);
ud4=simout1.signals.values(:,4);
uq4=simout1.signals.values(:,5);

ia4=simout2.signals.values(:,1);
ib4=simout2.signals.values(:,2);
ic4=simout2.signals.values(:,3);

rychl4=r.*omega4;
draha4=r.*theta4;

R=R_vekt(5); % 5
sim('m_15',[0 5]);

t5=simout.time;
id5=simout.signals.values(:,1);
```

```

iq5=simout.signals.values(:,2);
omega5=simout.signals.values(:,3);
theta5=simout.signals.values(:,4);

ua5=simout1.signals.values(:,1);
ub5=simout1.signals.values(:,2);
uc5=simout1.signals.values(:,3);
ud5=simout1.signals.values(:,4);
uq5=simout1.signals.values(:,5);

ia5=simout2.signals.values(:,1);
ib5=simout2.signals.values(:,2);
ic5=simout2.signals.values(:,3);

rychl5=r.*omega5;
draha5=r.*theta5;

figure(1)
plot(t1,ua1,'b',t2,ua2,'g',t3,ua3,'r',t4,ua4,'c',t5,ua5,'m'); grid
on;
xlabel('t [s]'); ylabel('u_a [V]');
legend('u_a pri R_1','u_a pri R_2','u_a pri R_3','u_a pri R_4','u_a
pri R_5','Location','Best');
title('Priebeh napätia u_a v case t, pri roznych teplotach vinutia
(premenny R)');

figure(2)
plot(t1,ub1,'b',t2,ub2,'g',t3,ub3,'r',t4,ub4,'c',t5,ub5,'m'); grid
on;
xlabel('t [s]'); ylabel('u_b [V]');
legend('u_b pri R_1','u_b pri R_2','u_b pri R_3','u_b pri R_4','u_b
pri R_5','Location','Best');
title('Priebeh napätia u_b v case t, pri roznych teplotach vinutia
(premenny R)');

figure(3)
plot(t1,uc1,'b',t2,uc2,'g',t3,uc3,'r',t4,uc4,'c',t5,uc5,'m'); grid
on;
xlabel('t [s]'); ylabel('u_c [V]');
legend('u_c pri R_1','u_c pri R_2','u_c pri R_3','u_c pri R_4','u_c
pri R_5','Location','Best');
title('Priebeh napätia u_c v case t, pri roznych teplotach vinutia
(premenny R)');

figure(4)
plot(t1,ua1,'b',t3,ua3,'b--',t5,ua5,'b:'); hold on;
plot(t1,ub1,'g',t3,ub3,'g--',t5,ub5,'g:');
plot(t1,uc1,'r',t3,uc3,'r--',t5,uc5,'r:'); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('u [V]');
legend('u_a pri R_1','u_a pri R_3','u_a pri R_5','u_b pri R_1','u_b
pri R_3','u_b pri R_5','u_c pri R_1','u_c pri R_3','u_c pri R_5',
'Location','Best');
title('Priebeh napätí u_a, u_b, u_c v case t, pri roznych teplotach
vinutia (premenny R)');
hold off;

```

```

figure(5)
plot(t1,ia1,'b',t2,ia2,'g',t3,ia3,'r',t4,ia4,'c',t5,ia5,'m'); grid
on;
xlabel('t [s]'); ylabel('i_a [A]');
legend('i_a pri R_1','i_a pri R_2','i_a pri R_3','i_a pri R_4','i_a
pri R_5','Location','Best');
title('Pribeh prudu i_a v case t, pri roznych teplotach vinutia
(premenny R)');

figure(6)
plot(t1,ib1,'b',t2,ib2,'g',t3,ib3,'r',t4,ib4,'c',t5,ib5,'m'); grid
on;
xlabel('t [s]'); ylabel('i_b [A]');
legend('i_b pri R_1','i_b pri R_2','i_b pri R_3','i_b pri R_4','i_b
pri R_5','Location','Best');
title('Pribeh prudu i_b v case t, pri roznych teplotach vinutia
(premenny R)');

figure(7)
plot(t1,ic1,'b',t2,ic2,'g',t3,ic3,'r',t4,ic4,'c',t5,ic5,'m'); grid
on;
xlabel('t [s]'); ylabel('i_c [A]');
legend('i_c pri R_1','i_c pri R_2','i_c pri R_3','i_c pri R_4','i_c
pri R_5','Location','Best');
title('Pribeh prudu i_c v case t, pri roznych teplotach vinutia
(premenny R)');

figure(8)
plot(t1,ia1,'b',t3,ia3,'b--',t5,ia5,'b:'); hold on;
plot(t1,ib1,'g',t3,ib3,'g--',t5,ib5,'g:');
plot(t1,ic1,'r',t3,ic3,'r--',t5,ic5,'r:'); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('i [A]');
legend('i_a pri R_1','i_a pri R_3','i_a pri R_5','i_b pri R_1','i_b
pri R_3','i_b pri R_5','i_c pri R_1','i_c pri R_3','i_c pri R_5',
'Location','Best');
title('Pribeh prudov i_a, i_b, i_c v case t, pri roznych teplotach
vinutia (premenny R)');
hold off;

figure(9)
plot(t1,ud1,'b',t2,ud2,'g',t3,ud3,'r',t4,ud4,'c',t5,ud5,'m'); grid
on;
xlabel('t [s]'); ylabel('u_d [V]');
legend('u_d pri R_1','u_d pri R_2','u_d pri R_3','u_d pri R_4','u_d
pri R_5','Location','Best');
title('Pribeh napatia na vstupe motora u_d v case t, pri roznych
teplotach vinutia (premenny R)');

figure(10)
plot(t1,uq1,'b',t2,uq2,'g',t3,uq3,'r',t4,uq4,'c',t5,uq5,'m'); grid
on;
xlabel('t [s]'); ylabel('u_q [V]');
legend('u_q pri R_1','u_q pri R_2','u_q pri R_3','u_q pri R_4','u_q
pri R_5','Location','Best');

```

```
title('Pribeh napatia na vstupe motora u_q v case t, pri roznych  
teplotach vinutia (premenny R)');
```

```
figure(11)
plot(t1,ud1,'b',t3,ud3,'b--',t5,ud5,'b:'); hold on;
plot(t1,uq1,'g',t3,uq3,'g--',t5,uq5,'g:'); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('u [V]');
legend('u_d pri R_1','u_d pri R_3','u_d pri R_5','u_q pri R_1','u_q  
pri R_3','u_q pri R_5','Location','Best');
title('Pribeh napati na vstupe motora u_d, u_q v case t, pri  
roznych teplotach vinutia (premenny R)');
hold off;
```

```
figure(12)
plot(t1,id1,'b',t2,id2,'g',t3,id3,'r',t4,id4,'c',t5,id5,'m'); grid  
on;
xlabel('t [s]'); ylabel('i_d [A]');
legend('i_d pri R_1','i_d pri R_2','i_d pri R_3','i_d pri R_4','i_d  
pri R_5','Location','Best');
title('Pribeh prudu motora i_d v case t, pri roznych teplotach  
vinutia (premenny R)');
```

```
figure(13)
plot(t1,iq1,'b',t2,iq2,'g',t3,iq3,'r',t4,iq4,'c',t5,iq5,'m'); grid  
on;
xlabel('t [s]'); ylabel('i_q [A]');
legend('i_q pri R_1','i_q pri R_2','i_q pri R_3','i_q pri R_4','i_q  
pri R_5','Location','Best');
title('Pribeh prudu motora i_q v case t, pri roznych teplotach  
vinutia (premenny R)');
```

```
figure(14)
plot(t1,id1,'b',t3,id3,'b--',t5,id5,'b:'); hold on;
plot(t1,iq1,'g',t3,iq3,'g--',t5,iq5,'g:'); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('i [A]');
legend('i_d pri R_1','i_d pri R_3','i_d pri R_5','i_q pri R_1','i_q  
pri R_3','i_q pri R_5','Location','Best');
title('Pribeh prudov motora i_d, i_q v case t, pri roznych  
teplotach vinutia (premenny R)');
hold off;
```

```
figure(15)
plot(t1,omega1,'b',t2,omega2,'g',t3,omega3,'r',t4,omega4,'c',t5,omeg  
a5,'m'); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('omega [rad/s]');
legend('omega pri R_1','omega pri R_2','omega pri R_3','omega pri  
R_4','omega pri R_5','Location','Best');
title('Pribeh uhlovej rychlosti omega v case t, pri roznych  
teplotach vinutia (premenny R)');
```

```
n1=(60/(2*pi())) *omega1;
n2=(60/(2*pi())) *omega2;
n3=(60/(2*pi())) *omega3;
n4=(60/(2*pi())) *omega4;
n5=(60/(2*pi())) *omega5;
```

```
figure(16)
plot(t1,n1,'b',t2,n2,'g',t3,n3,'r',t4,n4,'c',t5,n5,'m'); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('n [ot./min]');
legend('n pri R_1','n pri R_2','n pri R_3','n pri R_4','n pri R_5','Location','Best');
title('Pribeh otacok motora n v case t, pri roznych teplotach vinutia (premenny R)');

figure(17)
plot(t1,theta1,'b',t2,theta2,'g',t3,theta3,'r',t4,theta4,'c',t5,theta5,'m'); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('theta [rad]');
legend('theta pri R_1','theta pri R_2','theta pri R_3','theta pri R_4','theta pri R_5','Location','Best');
title('Pribeh uhloveho natocenia theta v case t, pri roznych teplotach vinutia (premenny R)');

figure(18)
plot(t1,rychl1,'b',t2,rychl2,'g',t3,rychl3,'r',t4,rychl4,'c',t5,rychl5,'m'); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('v_t [m/s]');
legend('v_t pri R_1','v_t pri R_2','v_t pri R_3','v_t pri R_4','v_t pri R_5','Location','Best');
title('Pribeh translacnej rychlosti v_t v case t, pri roznych teplotach vinutia (premenny R)');

figure(19)
plot(t1,draha1,'b',t2,draha2,'g',t3,draha3,'r',t4,draha4,'c',t5,draha5,'m'); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('draha [m]');
legend('d pri R_1','d pri R_2','d pri R_3','d pri R_4','d pri R_5','Location','Best');
title('Pribeh translacneho posunutia d v case t, pri roznych teplotach vinutia (premenny R)');
```

Program_mz.m

```
close all; clear all; clc;
%% Parametre motora %%

% Premenne parametre
m_z_vekt=[1 15 30 45 58.8580]; % [kg] Hmotnost zataze
% m_z=[1.000 2.800 7.700 21.200 55.000]; % [kg] Hmotnost zataze

Leng=0.360; % [m] Coil length - Elektricka dlzka rotora
r=Leng/(2*pi); % [m] polomer na prepocitavania z rotac. na translac. pohyb

m_m=3.4; % [kg] Hmotnost jazdca
m_c=m_m+m_z_vekt; % [kg] Hmotnost (pohybl.sucasti motora + zataze)
```

```

g=9.80665; % [m/s^2] Gravitačné zrychlenie
Mz_vekt=m_z_vekt.*g.*r; % [N.m] Zatažný moment
Jrot_vekt=m_c.*r^2; % [kg.m^2] Moment zotrvačnosti rotora

% Nepremenné parametre
R=6.8; % [Ohm] Odpor statora

Ld=6*10^(-3); % [H] Indukčnost statora
Lq=6*10^(-3); % [H] Indukčnost rotora

Pp=6; % [-] Počet polových dvojic motora

KErot=(77.155*Leng)/(2*pi); % [V.s/rad] Konstanta elektromotorickéj
sily, prepoc. na rotacnu

% Pre (PI) R_id, R_iq
Kd1=20;
Kq1=20;

% Pre (PID) R_w
Kw=4;
T1=0.110;
T2=0.020;

% Pre (PD) R_theta
Kth=3.0;
Th=0.002;

% Realizačná čas. konstanta eps
eps=0.001;

d=0.720; % [m] žiadany posun jazdca motora, 0.06 m je asi 1
rad
theta_ziad=d/r;

% Hodnoty Obmedzeni
Obm_id=6;
Obm_iq=6;

%% Vplyv variability parametrov
m_z=m_z_vekt(1); % 1
Mz=Mz_vekt(1);
Jrot=Jrot_vekt(1);

sim('m_15',[0 5]);

t1=simout.time;
id1=simout.signals.values(:,1);
iq1=simout.signals.values(:,2);
omegal=simout.signals.values(:,3);
thetal=simout.signals.values(:,4);

```



```
ua1=simout1.signals.values(:,1);
ub1=simout1.signals.values(:,2);
uc1=simout1.signals.values(:,3);
ud1=simout1.signals.values(:,4);
uq1=simout1.signals.values(:,5);
```

```
ia1=simout2.signals.values(:,1);
ib1=simout2.signals.values(:,2);
ic1=simout2.signals.values(:,3);
```

```
rychl1=r.*omega1;
draha1=r.*theta1;
```

```
m_z=m_z_vekt(2); % 2
Mz=Mz_vekt(2);
Jrot=Jrot_vekt(2);
```

```
sim('m_15',[0 5]);
```

```
t2=simout.time;
id2=simout.signals.values(:,1);
iq2=simout.signals.values(:,2);
omega2=simout.signals.values(:,3);
theta2=simout.signals.values(:,4);
```

```
ua2=simout1.signals.values(:,1);
ub2=simout1.signals.values(:,2);
uc2=simout1.signals.values(:,3);
ud2=simout1.signals.values(:,4);
uq2=simout1.signals.values(:,5);
```

```
ia2=simout2.signals.values(:,1);
ib2=simout2.signals.values(:,2);
ic2=simout2.signals.values(:,3);
```

```
rychl2=r.*omega2;
draha2=r.*theta2;
```

```
m_z=m_z_vekt(3); % 3
Mz=Mz_vekt(3);
Jrot=Jrot_vekt(3);
```

```
sim('m_15',[0 5]);
```

```
t3=simout.time;
id3=simout.signals.values(:,1);
iq3=simout.signals.values(:,2);
omega3=simout.signals.values(:,3);
theta3=simout.signals.values(:,4);
```

```
ua3=simout1.signals.values(:,1);
ub3=simout1.signals.values(:,2);
```

```
uc3=simout1.signals.values(:,3);
ud3=simout1.signals.values(:,4);
uq3=simout1.signals.values(:,5);

ia3=simout2.signals.values(:,1);
ib3=simout2.signals.values(:,2);
ic3=simout2.signals.values(:,3);

rychl3=r.*omega3;
draha3=r.*theta3;

m_z=m_z_vekt(4); % 4
Mz=Mz_vekt(4);
Jrot=Jrot_vekt(4);

sim('m_15',[0 5]);

t4=simout.time;
id4=simout.signals.values(:,1);
iq4=simout.signals.values(:,2);
omega4=simout.signals.values(:,3);
theta4=simout.signals.values(:,4);

ua4=simout1.signals.values(:,1);
ub4=simout1.signals.values(:,2);
uc4=simout1.signals.values(:,3);
ud4=simout1.signals.values(:,4);
uq4=simout1.signals.values(:,5);

ia4=simout2.signals.values(:,1);
ib4=simout2.signals.values(:,2);
ic4=simout2.signals.values(:,3);

rychl4=r.*omega4;
draha4=r.*theta4;

m_z=m_z_vekt(5); % 5
Mz=Mz_vekt(5);
Jrot=Jrot_vekt(5);

sim('m_15',[0 5]);

t5=simout.time;
id5=simout.signals.values(:,1);
iq5=simout.signals.values(:,2);
omega5=simout.signals.values(:,3);
theta5=simout.signals.values(:,4);

ua5=simout1.signals.values(:,1);
ub5=simout1.signals.values(:,2);
uc5=simout1.signals.values(:,3);
ud5=simout1.signals.values(:,4);
uq5=simout1.signals.values(:,5);
```

```

ia5=simout2.signals.values(:,1);
ib5=simout2.signals.values(:,2);
ic5=simout2.signals.values(:,3);

rychl5=r.*omega5;
draha5=r.*theta5;

figure(1)
plot(t1,ua1,'b',t2,ua2,'g',t3,ua3,'r',t4,ua4,'c',t5,ua5,'m'); grid
on;
xlabel('t [s]'); ylabel('u_a [V]');
legend('u_a pri m_z1','u_a pri m_z2','u_a pri m_z3','u_a pri
m_z4','u_a pri m_z5','Location','Best');
title('Pribeh napatia u_a v case t, pri roznych hmotnostiach zataze
(premenna m_z)');

figure(2)
plot(t1,ub1,'b',t2,ub2,'g',t3,ub3,'r',t4,ub4,'c',t5,ub5,'m'); grid
on;
xlabel('t [s]'); ylabel('u_b [V]');
legend('u_b pri m_z1','u_b pri m_z2','u_b pri m_z3','u_b pri
m_z4','u_b pri m_z5','Location','Best');
title('Pribeh napatia u_b v case t, pri roznych hmotnostiach zataze
(premenna m_z)');

figure(3)
plot(t1,uc1,'b',t2,uc2,'g',t3,uc3,'r',t4,uc4,'c',t5,uc5,'m'); grid
on;
xlabel('t [s]'); ylabel('u_c [V]');
legend('u_c pri m_z1','u_c pri m_z2','u_c pri m_z3','u_c pri
m_z4','u_c pri m_z5','Location','Best');
title('Pribeh napatia u_c v case t, pri roznych hmotnostiach zataze
(premenna m_z)');

figure(4)
plot(t1,ua1,'b',t3,ua3,'b--',t5,ua5,'b:'); hold on;
plot(t1,ub1,'g',t3,ub3,'g--',t5,ub5,'g:');
plot(t1,uc1,'r',t3,uc3,'r--',t5,uc5,'r:'); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('u [V]');
legend('u_a pri m_z1','u_a pri m_z3','u_a pri m_z5','u_b pri m_z1',
'u_b pri m_z3','u_b pri m_z5','u_c pri R_1','u_c pri R_3','u_c pri
R_5','Location','Best');
title('Pribeh napati u_a, u_b, u_c v case t, pri roznych
hmotnostiach zataze (premenna m_z)');
hold off;

figure(5)
plot(t1,ia1,'b',t2,ia2,'g',t3,ia3,'r',t4,ia4,'c',t5,ia5,'m'); grid
on;
xlabel('t [s]'); ylabel('i_a [A]');
legend('i_a pri m_z1','i_a pri m_z2','i_a pri m_z3','i_a pri
m_z4','i_a pri m_z5','Location','Best');
title('Pribeh prudu i_a v case t, pri roznych hmotnostiach zataze
(premenna m_z)');

```

```
figure(6)
plot(t1,ib1,'b',t2,ib2,'g',t3,ib3,'r',t4,ib4,'c',t5,ib5,'m'); grid
on;
xlabel('t [s]'); ylabel('i_b [A]');
legend('i_b pri m_z1','i_b pri m_z2','i_b pri m_z3','i_b pri
m_z4','i_b pri m_z5','Location','Best');
title('Priebeh prudu i_b v case t, pri roznych hmotnostiach zataze
(premenna m_z)');
```

```
figure(7)
plot(t1,ic1,'b',t2,ic2,'g',t3,ic3,'r',t4,ic4,'c',t5,ic5,'m'); grid
on;
xlabel('t [s]'); ylabel('i_c [A]');
legend('i_c pri m_z1','i_c pri m_z2','i_c pri m_z3','i_c pri
m_z4','i_c pri m_z5','Location','Best');
title('Priebeh prudu i_c v case t, pri roznych hmotnostiach zataze
(premenna m_z)');
```

```
figure(8)
plot(t1,ia1,'b',t3,ia3,'b--',t5,ia5,'b:'); hold on;
plot(t1,ib1,'g',t3,ib3,'g--',t5,ib5,'g:');
plot(t1,ic1,'r',t3,ic3,'r--',t5,ic5,'r:'); grid on;
% plot(t,ua,t,ub,t,uc); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('i [A]');
legend('i_a pri m_z1','i_a pri m_z3','i_a pri m_z5','i_b pri
m_z1','i_b pri m_z3','i_b pri m_z5','i_c pri m_z1','i_c pri
m_z3','i_c pri m_z5','Location','Best');
title('Priebeh prudov i_a, i_b, i_c v case t, pri roznych
hmotnostiach zataze (premenna m_z)');
hold off;
```

```
figure(9)
plot(t1,ud1,'b',t2,ud2,'g',t3,ud3,'r',t4,ud4,'c',t5,ud5,'m'); grid
on;
xlabel('t [s]'); ylabel('u_d [V]');
legend('u_d pri m_z1','u_d pri m_z2','u_d pri m_z3','u_d pri
m_z4','u_d pri m_z5','Location','Best');
title('Priebeh napatia na vstupe motora u_d v case t, pri roznych
hmotnostiach zataze (premenna m_z)');
```

```
figure(10)
plot(t1,uq1,'b',t2,uq2,'g',t3,uq3,'r',t4,uq4,'c',t5,uq5,'m'); grid
on;
xlabel('t [s]'); ylabel('u_q [V]');
legend('u_q pri m_z1','u_q pri m_z2','u_q pri m_z3','u_q pri
m_z4','u_q pri m_z5','Location','Best');
title('Priebeh napatia na vstupe motora u_q v case t, pri roznych
hmotnostiach zataze (premenna m_z)');
```

```
figure(11)
plot(t1,ud1,'b',t3,ud3,'b--',t5,ud5,'b:'); hold on;
plot(t1,uq1,'g',t3,uq3,'g--',t5,uq5,'g:'); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('u [V]');
legend('u_d pri m_z1','u_d pri m_z3','u_d pri m_z5','u_q pri
m_z1','u_q pri m_z3','u_q pri m_z5','Location','Best');
```

```

title('Priebeh napati na vstupe motora u_d, u_q v case t, pri
roznych hmotnostiach zataze (premenna m_z)');
hold off;

figure(12)
plot(t1,id1,'b',t2,id2,'g',t3,id3,'r',t4,id4,'c',t5,id5,'m'); grid
on;
xlabel('t [s]'); ylabel('i_d [A]');
legend('i_d pri m_z1','i_d pri m_z2','i_d pri m_z3','i_d pri
m_z4','i_d pri m_z5','Location','Best');
title('Priebeh prudu motora i_d v case t, pri roznych hmotnostiach
zataze (premenna m_z)');

figure(13)
plot(t1,iq1,'b',t2,iq2,'g',t3,iq3,'r',t4,iq4,'c',t5,iq5,'m'); grid
on;
xlabel('t [s]'); ylabel('i_q [A]');
legend('i_q pri m_z1','i_q pri m_z2','i_q pri m_z3','i_q pri
m_z4','i_q pri m_z5','Location','Best');
title('Priebeh prudu motora i_q v case t, pri roznych hmotnostiach
zataze (premenna m_z)');

figure(14)
plot(t1,id1,'b',t3,id3,'b--',t5,id5,'b:'); hold on;
plot(t1,iq1,'g',t3,iq3,'g--',t5,iq5,'g:'); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('i [A]');
legend('i_d pri m_z1','i_d pri m_z3','i_d pri m_z5','i_q pri
m_z1','i_q pri m_z3','i_q pri m_z5','Location','Best');
title('Priebeh prudov motora i_d, i_q v case t, pri roznych
hmotnostiach zataze (premenna m_z)');
hold off;

figure(15)
plot(t1,omega1,'b',t2,omega2,'g',t3,omega3,'r',t4,omega4,'c',t5,omeg
a5,'m'); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('omega [rad/s]');
legend('omega pri m_z1','omega pri m_z2','omega pri m_z3','omega pri
m_z4','omega pri m_z5','Location','Best');
title('Priebeh uhlovej rychlosti omega v case t, pri roznych
hmotnostiach zataze (premenna m_z)');

n1=(60/(2*pi())) *omega1;
n2=(60/(2*pi())) *omega2;
n3=(60/(2*pi())) *omega3;
n4=(60/(2*pi())) *omega4;
n5=(60/(2*pi())) *omega5;

figure(16)
plot(t1,n1,'b',t2,n2,'g',t3,n3,'r',t4,n4,'c',t5,n5,'m'); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('n [ot./min]');
legend('n pri m_z1','n pri m_z2','n pri m_z3','n pri m_z4','n pri
m_z5','Location','Best');
title('Priebeh otacok motora n v case t, pri roznych hmotnostiach
zataze (premenna m_z)');

```

```
figure(17)
plot(t1,theta1,'b',t2,theta2,'g',t3,theta3,'r',t4,theta4,'c',t5,theta5,'m'); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('theta [rad]');
legend('theta pri m_z1','theta pri m_z2','theta pri m_z3','theta pri m_z4','theta pri m_z5','Location','Best');
title('Priebeh uhloveho natocenia theta v case t, pri roznych hmotnostiach zataze (premenna m_z)');
```

```
figure(18)
plot(t1,rychl1,'b',t2,rychl2,'g',t3,rychl3,'r',t4,rychl4,'c',t5,rychl5,'m'); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('v_t [m/s]');
legend('v_t pri m_z1','v_t pri m_z2','v_t pri m_z3','v_t pri m_z4','v_t pri m_z5','Location','Best');
title('Priebeh translacnej rychlosti v_t v case t, pri roznych hmotnostiach zataze (premenna m_z)');
```

```
figure(19)
plot(t1,draha1,'b',t2,draha2,'g',t3,draha3,'r',t4,draha4,'c',t5,draha5,'m'); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('draha [m]');
legend('d pri m_z1','d pri m_z2','d pri m_z3','d pri m_z4','d pri m_z5','Location','Best');
title('Priebeh translacneho posunutia d v case t, pri roznych hmotnostiach zataze (premenna m_z)');
```

Program_Kriteria.m

```
close all; clear all; clc;
%% Parametre motora %%

R=6.8; % [Ohm] Odpor statora

Ld=6*10^(-3); % [H] Indukcnost statora
Lq=6*10^(-3); % [H] Indukcnost rotora

Pp=6; % [-] Pocet polovych dvojic motora

Leng=0.360; % [m] Coil length
r=Leng/(2*pi); % [m] polomer na prepocitavania z rotac. na translac. pohyb

m_m=3.4; % [kg] Hmotnost jazdca
m_z=58.858; % [kg] Hmotnost zataze
m_c=m_m+m_z; % [kg] Hmotnost (pohyb + sucasti motora + zataze)

g=9.80665; % [m/s^2] Gravitacne zrychlenie
Mz=m_z*g*r; % [N.m] Zatazny moment

KErot=(77.155*Leng)/(2*pi); % [V.s/rad] Konstanta elektromotorickej sily, prepoc. na rotacnu
Jrot=m_c*r^2; % [kg.m^2] Moment zotrvačnosti rotora
```

```
% Pre (PI) R_id, R_iq
Kd1=20;
Kq1=20;

% Pre (PID) R_w
Kw=4.0;
T1=0.110;
T2=0.020;

% Pre (PD) R_theta
Kth=3.0;
Th=0.002;

% Realizacna cas. konstanta eps
eps=0.001;

d=0.720;          % [m] ziadany posun jazdca motora, 0.06 m je asi 1
rad
theta_ziad=d/r;

% Hodnoty Obmedzeni
Obm_id=6;
Obm_iq=6;

sim('m_15',[0 5]);

t=simout.time;
id=simout.signals.values(:,1);
iq=simout.signals.values(:,2);
omega=simout.signals.values(:,3);
theta=simout.signals.values(:,4);

ua=simout1.signals.values(:,1);
ub=simout1.signals.values(:,2);
uc=simout1.signals.values(:,3);
ud=simout1.signals.values(:,4);
uq=simout1.signals.values(:,5);

ia=simout2.signals.values(:,1);
ib=simout2.signals.values(:,2);
ic=simout2.signals.values(:,3);

th_ziad=simout3.signals.values(:,1);
w_ziad=simout3.signals.values(:,2);
idq_ziad=simout3.signals.values(:,3);

rychl=r.*omega;
draha=r.*theta;

% Vyhodnotenie kvality regulacie
disp('Hodnotenie kvality regulacie J = [J_id J_iq J_w J_th]');
J_id=Kvadrat(t,idq_ziad,id);
J_iq=Kvadrat(t,idq_ziad,iq);
J_w=Kvadrat(t,w_ziad,omega);
```

```
J_th=Kvadrat(t,th_ziad,theta);
J_Kvadrat=[J_id J_iq J_w J_th]

J_id=ULk(t,idq_ziad,id);
J_iq=ULk(t,idq_ziad,iq);
J_w=ULk(t,w_ziad,omega);
J_th=ULk(t,th_ziad,theta);
J_ULk=[J_id J_iq J_w J_th]

J_id=ITAEk(t,idq_ziad,id);
J_iq=ITAEk(t,idq_ziad,iq);
J_w=ITAEk(t,w_ziad,omega);
J_th=ITAEk(t,th_ziad,theta);
J_ITAE=[J_id J_iq J_w J_th]

figure(1)
plot(t,ua); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('u_a [V]');
legend('u_a', 'Location', 'Best');
title('Priebeh napatia u_a v case t');

figure(2)
plot(t,ub); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('u_b [V]');
legend('u_b', 'Location', 'Best');
title('Priebeh napatia u_b v case t');

figure(3)
plot(t,uc); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('u_c [V]');
legend('u_c', 'Location', 'Best');
title('Priebeh napatia u_c v case t');

figure(4)
plot(t,ua,t,ub,t,uc); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('u [V]');
legend('u_a', 'u_b', 'u_c', 'Location', 'Best');
title('Priebeh napati u_a, u_b, u_c v case t');

figure(5)
plot(t,ia); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('i [A]');
legend('i_a', 'Location', 'Best');
title('Priebeh prudu motora i_a v case t');

figure(6)
plot(t,ib); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('i [A]');
legend('i_b', 'Location', 'Best');
title('Priebeh prudu motora i_b v case t');

figure(7)
plot(t,ic); grid on;
```



```

xlabel('t [s]'); ylabel('i [A]');
legend('i_c', 'Location', 'Best');
title('Priebeh prudu motora i_c v case t');

figure(8)
plot(t,ia,t,ib,t,ic); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('i [A]');
legend('i_a','i_b','i_c','Location','Best');
title('Priebeh prudov motora i_a, i_b, i_c v case t');

figure(9)
plot(t,ud); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('u_d [V]');
legend('u_d', 'Location', 'Best');
title('Priebeh napatia na vstupe motora u_d v case t');

figure(10)
plot(t,uq); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('u_q [V]');
legend('u_q', 'Location', 'Best');
title('Priebeh napatia na vstupe motora u_q v case t');

figure(11)
plot(t,ud,t,uq); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('u [V]');
legend('u_d','u_q','Location','Best');
title('Priebeh napati na vstupe motora u_d, u_q v case t');

figure(12)
plot(t,id); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('i_d [A]');
legend('i_d', 'Location', 'Best');
title('Priebeh prudu motora i_d v case t');

figure(13)
plot(t,iq); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('i_q [A]');
legend('i_q', 'Location', 'Best');
title('Priebeh prudu motora i_q v case t');

figure(14)
plot(t,id,t,iq); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('i [A]');
legend('i_d','i_q','Location','Best');
title('Priebeh prudov motora i_d, i_q v case t');

figure(15)
plot(t,omega); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('omega [rad/s]');
legend('omega', 'Location', 'Best');
title('Priebeh uhlovej rychlosti omega v case t');

t2=t/60;
n=(60/(2*pi())) *omega;
figure(16)

```

```
plot(t,n); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('n [ot./min]');
legend('n','Location','Best');
title('Pribeh otacok motora n v case t');

figure(17)
plot(t,theta); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('theta [rad]');
legend('theta','Location','Best');
title('Pribeh uhloveho natocenia theta v case t');

figure(18)
plot(t,rychl); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('v_t [m/s]');
legend('v_t','Location','Best');
title('Pribeh translacnej rychlosti v_t v case t');

figure(19)
plot(t,draha); grid on;
xlabel('t [s]'); ylabel('draha [m]');
legend('d','Location','Best');
title('Pribeh translacneho posunutia d v case t');
```

Kvadrat.m

```
%% Kvadraticke integralne kriterium kvality regulacie %%

% Vstupne parametre:  t vektor casu
%                      u vektor ziadanych hodnot
%                      y vektor vystupnych (skutocnych) hodnot
% Vystupne parametre: Jk kvadraticka regulacna plocha

function [Jk]=Kvadrat(t,u,y)
    e=u-y;
    eInf=sum(e((end-9):end)) /10;

    e2=(e-eInf).^2;    % integrand

    Jk=0;
    for i=1:(length(t)-1)
        usek=t(i+1)-t(i);
        Jk=Jk+ usek*e2(i);
    end
```

Ulk.m

```
%% Modifik. kriterium usmernenej linear. plochy %%

% Vstupne parametre:  t vektor casu
%                      u vektor ziadanych hodnot
%                      y vektor vystupnych (skutocnych) hodnot
% Vystupne parametre: J_ULk usmernena linear. regulacna plocha
```

```
function [J_ULk]=ULk(t,u,y)
    e=u-y;
    eInf=sum(e((end-9):end)) /10;

    e2=abs(e-eInf);    % integrand

    J_ULk=0;
    for i=1:(length(t)-1)
        usek=t(i+1)-t(i);
        J_ULk=J_ULk+ usek*e2(i);
    end
```

ITAEk.m

```
% ITAE kritérium kvality regulácie %%

% Vstupne parametre:  t vektor casu
%                      u vektor ziadanych hodnot
%                      y vektor vystupnych (skutocnych) hodnot
% Vystupne parametre: J_Itae regulacna plocha podla ITAE

function [J_Itae]=ITAEk(t,u,y)
    e=u-y;
    eInf=sum(e((end-9):end)) /10;

    e2=abs(e-eInf) .*t;    % integrand

    J_Itae=0;
    for i=1:(length(t)-1)
        usek=t(i+1)-t(i);
        J_Itae=J_Itae+ usek*e2(i);
    end
```